



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas utilizando pavimento reciclado, ligantes hidráulicos y emulsiones asfálticas

Pablo José Hernández Hernández

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2014

Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas utilizando pavimento reciclado, ligantes hidráulicos y emulsiones asfálticas

Pablo José Hernández Hernández

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Geotecnia

Directora:

PhD. Carol Andrea Murillo Feo

Línea de Investigación:

Modelación y análisis en geotecnia

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2014

Dedicatoria

A mis padres, quienes son los pilares fundamentales de mi vida. A mi familia, novia y amigos, quienes nunca dejaron de creer en mí. Y principalmente a Dios quien me acompaña en cada jornada.

Agradecimientos

El autor agradece a la directora del trabajo final de maestría, la Profesora Carol Murillo quien con su constante orientación y acertados consejos, aportó en gran medida al desarrollo de este trabajo de investigación.

El autor agradece especialmente al Profesor Ferney Betancourt, quien prestó su valiosa asesoría en la elaboración de ensayos para la caracterización de asfalto recuperado del RAP.

El autor también agradece a los laboratoristas que con su entrega y esfuerzo permitieron llevar a cabo la campaña experimental y a todas las demás personas que en algún momento colaboraron con sus conceptos y sugerencias.

Resumen

Actualmente el uso de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) se ha convertido en una opción muy conveniente para el fomento de lo que se conoce como carreteras sostenibles. En ese sentido el empleo de pavimentos reciclados promete un menor consumo de recursos naturales y energía, ya que la reducción del calor necesario para la fabricación de mezclas asfálticas en caliente, hace más amigable con el medio ambiente el uso de pavimentos asfálticos. No obstante, la cuantificación de estos beneficios e impactos en el medio ambiente aun es desconocida.

Por otro lado el empleo de RAP, considerado como un material de desecho en la construcción de estructuras de pavimento nuevas, ofrece una disminución en los costos de los proyectos viales asociados a la explotación de materiales vírgenes de cantera, lo que facilita la viabilidad de desarrollar proyectos que no podrían materializarse empleando materiales y técnicas convencionales de construcción.

Adicionalmente, la utilización de RAP en la técnica de fresado estabilizado con emulsión asfáltica, genera la posibilidad de habilitar vías para el uso por parte del tráfico liviano, que nunca han tenido una estructura de pavimento adecuada y mejorar la calidad de vida de las personas en barrios en crecimiento de la periferia de la ciudad.

Consecuentemente en esta investigación se caracterizó de manera integral el material de desecho denominado RAP, mediante la realización de ensayos granulométricos debido a que se necesitaba conocer a fondo las propiedades de este material como granular. Adicionalmente se elaboraron ensayos sobre el asfalto recuperado del RAP mediante extracción, con el objetivo de conocer el estado de oxidación del asfalto presente en el RAP.

Luego de establecer las propiedades granulométricas del RAP, se consideró fabricar una mezcla asfáltica a partir de este material, teniendo en cuenta a la emulsión asfáltica

como un elemento que proporciona trabajabilidad en obra y aporta la liga necesaria entre las partículas de agregado.

Así mismo se consideró estudiar la variación de la resistencia de la mezcla con distintas adiciones de cemento portland. Complementariamente se analiza la influencia del contenido de agua en la mezcla bituminosa reciclada en frío con cemento hidráulico.

Luego de caracterizar mecánicamente la mezcla, como producto de este trabajo de investigación se propone el empleo de la mezcla bituminosa reciclada con cemento hidráulico, discutiendo los beneficios y limitaciones asociados al comportamiento de la mezcla.

Palabras clave: medio ambiente, mezcla asfáltica, material de desecho, estructura de pavimento nueva, caracterización mecánica.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XV
Lista de Fotografías	XVII
Introducción	1
Antecedentes.....	5
Objetivos.....	10
Hipótesis del estudio	11
Metodología del estudio	12
1. Marco Conceptual	15
1.1 Definición de la mezcla reciclada en frío y sus componentes.....	15
1.1.1 Pavimento asfáltico reciclado (RAP)	16
1.1.2 Agua	19
1.1.3 Definición de emulsión y emulsiones asfálticas	19
1.1.4 Ligante hidráulico	21
1.2 Estado del arte de las mezclas asfálticas frías fabricadas con emulsión asfáltica y cemento portland.....	23
1.2.1 Diseño de mezclas asfálticas frías utilizando pavimentos reciclados...	27
1.2.2 Metodologías de diseño de mezclas bituminosas recicladas aplicadas en Bogotá D.C.....	28
1.2.3 Revisión de experiencias en estudios de mezclas frías para la determinación de contenidos óptimos de agua y emulsión asfáltica	30
1.2.4 Revisión de experiencias en estudios que emplean la adición de cemento en mezclas asfálticas frías	33
2. Campaña experimental	35
2.1 Caracterización de la emulsión asfáltica	39
2.2 Caracterización del RAP	40
2.2.1 Caracterización granulométrica del RAP	40
2.2.2 Caracterización de asfalto recuperado del RAP	48
2.2.3 Caracterización de agregado recuperado del RAP	57

2.3	Determinación de los contenidos óptimos teóricos de emulsión asfáltica, agua y cemento para la mezcla (MBRF+CH)	58
2.4	Caracterización mecánica de la mezcla bituminosa reciclada en frío con cemento hidráulico (MBRF+CH)	60
2.4.1	Fabricación de briquetas.....	61
2.4.2	Ensayo Marshall (Estabilidad y flujo) (INV E-748).....	64
2.4.3	Ensayo de Tracción Indirecta (INV E-725).....	65
2.4.4	Influencia del tiempo de curado en la resistencia de la mezcla bituminosa reciclada en frío con cemento	67
2.4.5	Ensayo de Inmersión-compresión (INV E-738)	68
2.4.6	Ensayo de Ahuellamiento (INV E-779).....	70
2.4.7	Ensayo de Módulo Dinámico (INV E-754).....	73
3.	Resultados y análisis.....	77
3.1	Análisis de las propiedades granulares del RAP	77
3.2	Análisis de las propiedades del asfalto envejecido	82
3.3	Análisis de las propiedades del agregado recuperado luego de la extracción de asfalto	89
3.4	Caracterización mecánica de la mezcla bituminosa reciclada en frío con cemento hidráulico (MBRF+CH)	90
3.4.1	Ensayo Marshall (Estabilidad y flujo)	91
3.4.2	Ensayo de Tracción Indirecta.....	96
3.4.3	Evaluación de la influencia del tiempo de curado en la resistencia de la mezcla 103	103
3.4.4	Ensayo de Inmersión-Compresión.....	105
3.4.5	Ensayo de Ahuellamiento	111
3.4.6	Ensayo de Módulo Dinámico	114
3.5	Análisis integral de los resultados obtenidos en la caracterización mecánica de la mezcla bituminosa reciclada en frío con cemento hidráulico (MBRF+CH)	124
4.	Conclusiones y recomendaciones	131
4.1	Conclusiones.....	131
4.2	Recomendaciones.....	134
	Bibliografía	137
	A. Anexo: Metodologías para la estimación del contenido óptimo de emulsión asfáltica para mezclas frías recicladas.....	143
	B. Anexo: Aplicación de las metodologías para estimar el contenido óptimo de emulsión asfáltica en las mezclas frías recicladas.....	155
	C. Anexo: Curvas maestras del módulo dinámico para la mezcla MBRF+CH_33.....	160
	D. Anexo: Resultados de ensayos de laboratorio.....	166
	E. Anexo: Registro fotográfico de la campaña experimental.....	167

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1: Esquema resumido de la metodología de investigación.....	13
Figura 2: Esquema de una emulsión	20
Figura 3: Efecto del cemento Portland sobre el módulo de rigidez de mezclas frías	24
Figura 4: Efecto del cemento Portland sobre la resistencia a la deformación permanente de mezclas frías	25
Figura 5: Efecto del cemento Portland sobre la resistencia a la fatiga de mezclas frías	26
Figura 6: Diagrama de flujo de la metodología de la campaña experimental.....	36
Figura 7: Sitio de disposición temporal de RAP.....	38
Figura 8: Nomenclatura para identificación de la emulsión asfáltica.....	40
Figura 9: Curva granulométrica del RAP	41
Figura 10: Curva granulométrica del RAP ajustada a la especificación IDU.....	42
Figura 11: Curva granulométrica del agregado obtenido después de la extracción de asfalto	57
Figura 12: Nomenclatura para identificación de la mezcla.....	60
Figura 13: Nomenclatura para identificación de briquetas	64
Figura 14: Comparación de la granulometría del RAP respecto a las especificaciones IDU	79
Figura 15: Valores de Viscosidad reportados por la empresa Incoasfaltos S.A. para un asfalto de penetración 80-100 tomado como referencia.	88
Figura 16: Comparación de la granulometría del agregado recuperado posterior a la extracción de asfalto respecto a las especificaciones IDU.....	89
Figura 17: Resultados de estabilidad para el ensayo Marshall	93
Figura 18: Resultados del parámetro de flujo a partir del ensayo Marshall.....	93
Figura 19: Resistencia seca para el ensayo de Tracción Indirecta	98
Figura 20: Resistencia húmeda a partir del ensayo de Tracción Indirecta.....	99
Figura 21: Resistencia conservada para el ensayo de Tracción Indirecta	100
Figura 22: Resultado del ensayo de tracción indirecta para distintos tiempo de curado	104
Figura 23: Resistencia seca a partir del ensayo de Inmersión-Compresión	107
Figura 24: Resistencia húmeda a partir del ensayo de Inmersión-Compresión	107
Figura 25: Resistencia conservada a partir del ensayo de Inmersión-Compresión....	108
Figura 26: Gráficas de deformación en función del número de ciclos.....	112

Figura 27:	Gráficas de deformación en función del contenido de cemento	112
Figura 28:	Módulo Dinámico en función de la frecuencia de carga a 9.1 °C	115
Figura 29:	Módulo Dinámico en función de la frecuencia de carga a 20.1°C	116
Figura 30:	Módulo Dinámico en función de la frecuencia de carga a 30.1°C	116
Figura 31:	Módulo Dinámico en función del contenido de cemento a 9.1 °C.....	117
Figura 32:	Módulo Dinámico en función del contenido de cemento a 20.1°C.....	118
Figura 33:	Módulo Dinámico en función del contenido de cemento a 30.1°C.....	118
Figura 34:	Curvas maestras del Módulo Dinámico para la mezcla MBRF+CH_33	122
Figura 35:	Módulo Dinámico en función del coeficiente de aporte estructural (a_i)	123
Figura 36:	Método del Instituto del asfalto para determinar el contenido óptimo teórico de emulsión	152
Figura 37:	Método del Estado de Oregon (USA) para determinar el contenido óptimo teórico de emulsión	153
Figura 38:	Módulo Dinámico para la mezcla MBRF+CH_33 con 4% de cemento	161
Figura 39:	Construcción de la curva maestra del Módulo Dinámico para la mezcla MBRF+CH_33 con 4% de cemento	162
Figura 40:	Curva maestra del Módulo Dinámico para la mezcla MBRF+CH_33 con 4% de cemento	163
Figura 41:	Curvas maestras del Módulo Dinámico para la mezcla MBRF+CH_33	165

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Granulometría admisible para el reciclaje de pavimentos	17
Tabla 2: Contenidos óptimos de emulsión, agua y cemento obtenidos en rehabilitaciones de carreteras de Andalucía – España.	31
Tabla 3: Contenido óptimo de fluidos de compactación obtenidos en el plan piloto de investigación (USA)	32
Tabla 4: Contenido óptimo de fluidos de compactación obtenidos para estudios en la ciudad de Bogotá	33
Tabla 5: Propiedades físicas del cemento portland tipo 1	37
Tabla 6: Propiedades físicas de la emulsión asfáltica CRL-1	40
Tabla 7: Características físicas del agregado RAP	48
Tabla 8: Características físicas del asfalto recuperado del RAP	57
Tabla 9: Resumen de las estimaciones del cálculo teórico de emulsión asfáltica para la mezcla reciclada.....	58
Tabla 10: Contenidos de cada componente de la mezcla	61
Tabla 11: Briquetas elaboradas para los ensayos de carga estática	63
Tabla 12: Briquetas elaboradas para los ensayos de carga dinámica	63
Tabla 13: Briquetas utilizadas en el ensayo Marshall	65
Tabla 14: Briquetas utilizadas en el ensayo de tracción indirecta.....	66
Tabla 15: Briquetas utilizadas para evaluar la variación de la resistencia por curado	68
Tabla 16: Briquetas utilizadas en el ensayo de Inmersión-Compresión.....	69
Tabla 17: Equivalencia de energía para la compactación de la briqueta tipo panela.	71
Tabla 18: Briquetas utilizadas para el ensayo de Ahuellamiento	72
Tabla 19: Equivalencia de energía para la compactación de la briqueta de módulo dinámico	74
Tabla 20: Briquetas utilizadas en el ensayo de Módulo dinámico.....	75
Tabla 21: Análisis de las propiedades granulares del RAP	78
Tabla 22: Análisis de las propiedades del asfalto envejecido	83
Tabla 23: Niveles de tránsito IDU.....	90
Tabla 24: Niveles de tránsito INVÍAS	91
Tabla 25: Valores obtenidos en el ensayo Marshall	92
Tabla 26: Valores referentes para el ensayo Marshall	94
Tabla 27: Valores obtenidos en el ensayo Tracción Indirecta	97
Tabla 28: Valores referentes para el ensayo de Tracción Indirecta	101
Tabla 29: Valores obtenidos en el ensayo de tracción indirecta con 30 días de curado	103

Tabla 30:	Valores obtenidos en el ensayo de Inmersión - Compresión.....	106
Tabla 31:	Valores referentes para el ensayo Inmersión-Compresión.....	109
Tabla 32:	Valores obtenidos en el ensayo de Ahuellamiento.....	111
Tabla 33:	Valores comparados en el ensayo de Ahuellamiento.....	114
Tabla 34:	Valores obtenidos en el ensayo de Módulo Dinámico	115
Tabla 35:	Valores de referencia para el ensayo de Módulo Dinámico.....	120
Tabla 36:	Valores obtenidos en la caracterización mecánica de la mezcla MBRF+CH_23	125
Tabla 37:	Valores obtenidos en la caracterización mecánica de la mezcla MBRF+CH_33	126
Tabla 38:	Valores de resistencia para la mezcla MBRF+CH_33 con 4% de Cemento 128	
Tabla 39:	Tamices recomendados por el INVIAS para la aplicación de las fórmulas de Dueriez	145
Tabla 40:	Valores de K	146
Tabla 41:	Cálculo del porcentaje de cemento asfáltico requerido, según Duriez.	155
Tabla 42:	Cálculo del porcentaje óptimo teórico de emulsión asfáltica, según Duriez. 156	
Tabla 43:	Cálculo del porcentaje óptimo teórico de emulsión asfáltica, según Duriez, afectado por el porcentaje de asfalto en el RAP.....	156
Tabla 44:	Cálculo del porcentaje óptimo teórico de emulsión asfáltica con el método de Illinois	157
Tabla 45:	Factores de traslación para la mezcla MBRF+CH_33 con 4% de cemento 162	
Tabla 46:	Factores de ajuste WLF de la mezcla MBRF+CH_33	164
Tabla 47:	Constantes de las ecuaciones de curvas maestras	165

Lista de Fotografías

Fotografía 1:	Obtención de muestras de RAP en el lote de IDU	39
Fotografía 2:	Ensayo de granulometría	43
Fotografía 3	Determinación de la humedad natural de RAP	44
Fotografía 4	Ensayo de partículas alargadas y aplanadas de RAP.....	45
Fotografía 5	Ensayo de caras fracturadas del RAP	46
Fotografía 6	Ensayo de peso unitario del RAP	47
Fotografía 7	Ensayo de peso específico del RAP	47
Fotografía 8	Determinación del contenido de asfalto en el RAP usando gasolina.....	49
Fotografía 9	Extracción de asfalto del RAP usando tricloretileno	50
Fotografía 10	Recuperación de asfalto mediante el uso del rotavapor	51
Fotografía 11	Peso específico del asfalto solido.....	52
Fotografía 12	Punto de ablandamiento del asfalto	53
Fotografía 13	Penetración del asfalto.....	54
Fotografía 14	Ductilidad del asfalto	55
Fotografía 15	Viscosidad del asfalto.....	56
Fotografía 16	Procedimiento de mezclado	61
Fotografía 17	Ensayo Marshall.....	65
Fotografía 18	Ensayo de tracción indirecta	67
Fotografía 19	Ensayo de Inmersión – compresión	69
Fotografía 20	Molde para fabricación de las briquetas tipo panela.....	70
Fotografía 21	Máquina de la rueda cargada.....	73
Fotografía 22	Molde para fabricación de las briquetas de módulo dinámico.....	74
Fotografía 23	Briquetas para el ensayo de módulo dinámico	75

Introducción

El reciclaje de pavimentos es una técnica de rehabilitación de carreteras en la cual se usan materiales provenientes de capas asfálticas que ya han cumplido su vida útil. El componente bituminoso de dichos materiales ha perdido algunas de sus propiedades iniciales a causa del envejecimiento y procesos de oxidación, tales como la cohesión, la resiliencia, la textura, la composición y la geometría entre otros. Aun así estos materiales conservan el potencial de ser reutilizados para conformar nuevas capas de una estructura de pavimento.

El uso de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) en carpetas asfálticas se ha convertido en un tema de extremo interés en la industria de la construcción. Adicionalmente y debido al limitado espacio disponible en los botaderos o rellenos, la disminución de la cantidad de material virgen de cantera disponible para explotación y el alto costo del petróleo, el uso de RAP en la fabricación de mezclas asfálticas nuevas se ha vuelto bastante atractivo.

Según Loria-Salazar (2011), actualmente el uso de RAP se ha convertido en una opción muy conveniente para generar lo que se conoce como carreteras sostenibles. En ese sentido el empleo de RAP promete un menor consumo de recursos naturales y energía, ya que la reducción del calor necesario para la fabricación de mezclas asfálticas en caliente hace más sostenible el uso de pavimentos asfálticos. No obstante, la cuantificación de estos beneficios e impactos en el medio ambiente, aun es desconocida.

De acuerdo con Díaz (2005), según el tratamiento térmico, el tipo de ligante añadido y el lugar donde se lleve a cabo, se pueden diferenciar varias técnicas de reciclado de pavimentos asfálticos así:

- Por el tratamiento térmico del material:
 - Reciclaje en frío

- Reciclaje en caliente
- Por el tipo de ligante añadido al material
 - Emulsión asfáltica
 - Conglomerante hidráulico
 - Asfalto
- Por el lugar en que se lleva a cabo
 - Reciclaje “In situ”
 - Reciclaje en planta

La técnica de reciclaje que pretende estudiarse en este trabajo final de maestría consiste en el reciclaje en frío con emulsión asfáltica y cemento “In situ”, considerando que esta técnica de rehabilitación de pavimentos asfálticos ha tenido un constante crecimiento en las últimas dos décadas dadas sus importantes ventajas, a saber; rápida ejecución en la construcción, no es necesario crear o modificar la caja de la estructura del pavimento ni construir cunetas, bordillos, etc., y la interferencia con el tráfico es menor lo cual no crea la necesidad de cerrar la vía para realizar los trabajos.

Díaz (2005), también resalta que el aprovechamiento de materiales que en otro caso habrían sido transportados a botaderos y la reducción de los consumos energéticos necesarios en los procesos de fabricación, transporte y puesta en obra, hacen del reciclaje en frío una técnica ecológica y respetuosa con el medio ambiente, sin procesos contaminantes. Además, es más económico que otras alternativas y sus costos más reducidos permiten ampliar las medidas de rehabilitación a otros pavimentos.

Ávila (2011), presenta un documento titulado “Experiencias en obras de fresado estabilizado en la localidad de Engativá en Bogotá” en donde se muestran algunos aspectos de los procedimientos constructivos y características de los materiales empleados en el mejoramiento de vías en la localidad de Engativá en Bogotá D.C., mediante la aplicación de material fresado estabilizado con emulsión asfáltica. Se evidencia que el mejoramiento se realiza de forma empírica y que depende en buena parte de las habilidades de los obreros involucrados en el proceso constructivo. Este mejoramiento se diferencia de los procedimientos constructivos convencionales en que el

material fresado se extiende, mezcla y compacta sobre una superficie que no cuenta con una estructura de pavimento adecuada. Sin embargo presenta muchas ventajas para la comunidad dado que mejora las condiciones de movilidad, reduce el levantamiento de material particulado en tiempo seco (el cual afecta las vías respiratorias de las personas) y dado que las intervenciones son rápidas y sin tratamientos previos se abre paso al tráfico rápidamente y no se intervienen las redes existentes (agua potable, alcantarillado, etc.). Así mismo, es importante resaltar las desventajas mencionadas en este documento, donde se afirma que este mejoramiento es de carácter temporal, lo cual permite inferir que la durabilidad de la obra es relativamente baja con respecto a las mezclas convencionales, así como la resistencia de la mezcla que depende principalmente de las condiciones de uniformidad de la subrasante y es afectada negativamente por el bajo contenido de finos del RAP, lo cual se refleja en la aparición de agrietamientos superficiales.

Luego de analizar el trabajo de Needham y Brown (2000), donde se concluye que suministrar pequeñas adiciones de cemento portland a las mezclas asfálticas frías conformadas con material virgen y emulsión asfáltica, mejora significativamente la resistencia de la mezcla y disminuye los efectos de la fatiga en las mismas (como se podrá observar en la explicación proporcionada en el numeral 1.2), y contrastarlo con las conclusiones obtenidas por Díaz (2005), donde se afirma que las adiciones de cemento efectuadas sobre mezclas asfálticas recicladas en frío con emulsión asfáltica, no solo reducen la resistencia de la mezcla si no que produce efectos indeseados como la disminución de la resistencia a la tracción indirecta, se evidencia que no se presenta claridad acerca de la influencia del cemento en el comportamiento mecánico de este tipo de mezclas que usan emulsiones asfálticas, por lo que se vio la necesidad de investigar en este trabajo final de maestría algunos aspectos del comportamiento mecánico de las mezclas recicladas en frío con emulsión asfáltica cuando se les adiciona cemento.

De lo anterior nace la necesidad de conocer más a fondo algunos aspectos de los materiales y procesos utilizados en el mejoramiento, con el objetivo de estudiar las posibilidades de mejorar las características de resistencia y durabilidad de la mezcla.

Aun cuando se registra en este documento la existencia de criterios de diseño para mezclas asfálticas en frío, la falta de procedimientos de control en la ejecución de la obra, así como de especificaciones sobre el producto final y el desconocimiento de la evolución del comportamiento del material con el tiempo, no permiten la implementación masiva de este tipo de técnica.

Por lo anterior y con la motivación representada en las ventajas que a nivel medioambiental y energético que supone el empleo de estas mezclas, se propuso la realización del presente trabajo final de maestría. Con el fin de incentivar técnicas amigables con el medio ambiente y disminuir el consumo de recursos energéticos, en este trabajo se quiere evaluar el comportamiento mecánico de una mezcla fría de pavimento asfáltico reciclado con emulsión y la incorporación de un material de adición tal como el cemento portland.

Antecedentes

A principios del siglo XX las emulsiones asfálticas se utilizaban como agentes de control del polvo en las obras de construcción y mantenimiento de caminos y se empleó por primera vez la emulsión asfáltica aniónica en 1905 en la ciudad de Nueva York en riegos preventivos para el polvo. Posteriormente en 1914 el estado de Indiana (Estados Unidos) comenzó trabajos de reparación de caminos utilizando emulsiones asfálticas. Rivera (1998).

Entre 1925 y 1935 se registraron las primeras utilizaciones de emulsiones asfálticas en la construcción de carreteras en Europa y México, siendo el principal problema de emplear estos compuestos, su lento fraguado que ocasionaba extensos retrasos y enormes problemas constructivos.

Según Rodríguez et al., (2001) las emulsiones asfálticas catiónicas se conocieron en Latinoamérica en el año de 1960, siendo México uno de los primeros países en trabajarlas. En ese año se hicieron varias pruebas y los ingenieros mexicanos presentaron en el Congreso Panamericano de Carreteras en Bogotá, Colombia, un trabajo titulado: “Primeras investigaciones realizadas en México con emulsiones asfálticas catiónicas”.

El incentivo para reducir el consumo de combustibles en la crisis energética de los años '70 hizo que se generara un explosivo aumento en el uso de las emulsiones en la estabilización de agregado mineral, incluyendo el mezclado con material húmedo a temperaturas ambientales. Dado lo anterior, en este escenario se utilizaron intensamente los rebajados asfálticos, que según Mercado et al., (2008) son compuestos parecidos a las emulsiones asfálticas, ya que se componen de una fase fluida y una fase asfáltica

(conceptos que serán ampliados en el Capítulo 1), con la diferencia que la fase fluida no es agua, sino un compuesto volátil, que mediante el proceso de curado de la mezcla se evaporaba, ocasionando que se arrojaran toneladas de compuestos químicos nocivos para la atmosfera.

Complementando los beneficios de usar emulsiones asfálticas y motivados por la creciente conciencia de reducir los efectos nocivos sobre el medio ambiente debidos a la construcción de carreteras, en los años '70 se comenzó a recuperar las carpetas asfálticas que ya no funcionaban adecuadamente, mediante el procedimiento de fresado, que consiste en triturar la carpeta asfáltica con una máquina que hace girar unos rodillos dentados en línea recta sobre la superficie de corte, con una velocidad de giro del rodillo y una velocidad de avance de la maquina constantes.

Según Fabela et al. (1999), desde principios de la década del 70' se viene realizando investigaciones sobre los métodos de remoción de pavimentos asfálticos, entre los que se destacan el fresado y la escarificación. Este último se caracteriza por retirar la capa de pavimento con una máquina que realiza una trayectoria lineal paralela a la superficie del material a cortar, lo cual produce una superficie con una calidad inferior a la que se produce mediante el procedimiento de fresado, demandando así la realización de actividades adicionales para uniformizar la superficie de la cual será objeto la reparación. Además en este procedimiento no se obtienen granulometrías adecuadas para la reutilización del material extraído, por lo que sería necesario someterlo a un proceso de trituración, generando costos adicionales. Debido a las características que facilitan el reciclaje de pavimentos se dio mayor desarrollo a la técnica de fresado.

Para los años '80 ya existía una conciencia mucho más elaborada frente a los incalculables daños que estaba causando el hombre al medio ambiente, lo que conllevó a una disminución tan drástica de los rebajados asfálticos en la construcción de carreteras, que para comienzo de los años '90 el uso de estos compuestos ya estaba casi suprimido. Hoy en día no se utilizan en ninguna obra de mantenimiento o construcción de carreteras.

De acuerdo con Marini (2006), la rehabilitación de pavimentos con técnicas de reciclado podría estimarse en disminución de los costos en un 25% y disminución del uso de agregado virgen en 7000 toneladas por kilómetro. Se realizaron intentos de implementar las técnicas de reciclaje masivamente en los años 70' que no surtieron efecto sino hasta la década de los 80', para finalmente observar en la década de los 90 el florecimiento de estas técnicas. Los países donde más se utiliza el RAP en técnicas de reciclaje de pavimento son Marini (2006):

- España, donde se construyeron entre 1990 y 1998, 5'000.000 de metros cuadrados de pavimento empleando la técnica de reciclaje en frio in situ.
- Holanda, donde el 60% del asfalto producido contiene un buen porcentaje de materiales reciclados.
- Francia: donde las técnicas de reciclaje en frio y caliente suman la producción de 54000 toneladas de pavimento en la década del 90', siguiendo la tendencia de agregar 10% de RAP en las plantas de producción de asfalto en caliente.
- Italia: donde se recicla en promedio el 5% de los pavimentos asfálticos.

En una revisión cronológica de las especificaciones de construcción del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), se puede encontrar que en el año 1995 aún no se consideraba al RAP como material de construcción. No fue sino hasta el 18 de mayo de 2006 que mediante la resolución IDU 1959, se reguló el uso de los materiales obtenidos en el reciclaje de pavimento asfáltico en las secciones 450 y 454 de las especificaciones de construcción IDU-ET-2005.

En Bogotá se tienen registros de que a partir del año 2007, se utilizan las emulsiones asfálticas para estabilizar el material obtenido del fresado de capas de pavimento asfáltico que ya han cumplido su vida útil y han sido removidas para ser remplazadas por mezclas asfálticas nuevas.

Las obras de fresado estabilizado generan la posibilidad de habilitar vías para el uso por parte del tráfico liviano, que nunca han tenido estructura de pavimento y mejorar la calidad de vida en barrios en crecimiento en la periferia de la ciudad. En la ciudad de

Bogotá se ha venido utilizando este tipo de mejoramiento desde hace algunos años de forma extensa por parte de la Unidad de Mantenimiento Vial (UMV)

Según cifras obtenidas en el portal de internet www.fontisito.com entre el año 2007 y el 2010 se realizaron las intervenciones que se relacionan a continuación:

- En 2007: 259 mil metros cuadrados en vías de 96 barrios en 15 localidades.
- En 2008: se intervinieron 372 mil metros cuadrados en calles de 103 barrios en 17 localidades.
- En 2009: 356 mil metros cuadrados de vías. Se aplicó 'fresado estabilizado' en 194 barrios en 19 localidades.
- En 2010: 176 Kilómetro-carril, intervenidos en 'fresado estabilizado'. Fresado aplicado 74.781 m3.
- Los más de 987 mil metros cuadrados de vías intervenidas por la UMV con fresado estabilizado en los últimos cuatro años equivalen, aproximadamente, a 2.750 cuadras (cerca de 164 kilómetros lineales de vías locales). En estas obras se han utilizado cerca de 150 mil metros cúbicos de fresado estabilizado con emulsión asfáltica.

El 28 de octubre de 2011 se adoptaron mediante la resolución IDU 4428, la Guía para reciclaje de pavimento asfáltico in situ estabilizado con aditivos bituminosos y/o hidráulicos (GU-GE-011) y la Guía para estabilización del material producto del reciclaje en frío de pavimentos asfálticos (GU-GE-010).

Posteriormente mediante la resolución 4880 del 05 de diciembre de 2011, se implementan las especificaciones de construcción IDU-ET-2011, las cuales recogen en las secciones 450-11 y 454-11, los criterios de caracterización para los materiales obtenidos del reciclaje de pavimento asfáltico y los criterios de diseño de mezclas asfálticas que emplean estos materiales reciclados.

Por otro lado, los artículos 440-13, 460-13 y 461-13 de las especificaciones y normas de construcción INVIAS 2013, se refieren a los criterios para el diseño de mezclas densas en frío y el reciclaje de pavimento asfáltico en frío.

Objetivos

Objetivo general

Determinar el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas compuestas de RAP, cemento portland y emulsiones asfálticas.

Objetivos específicos

- Caracterizar el material obtenido del procedimiento de fresado de las vías de Bogotá D.C.
- Analizar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas obtenidas mediante la variación del contenido de cemento y agua en la mezcla.
- Realizar un análisis de variación de resistencia en la mezcla asfáltica reciclada en función del contenido de cemento portland y comparar con mezclas tradicionales y/o establecidas en las normas actuales.
- A partir de la caracterización mecánica de la mezcla asfáltica reciclada, generar las recomendaciones que sean del caso para su adecuado uso en proyectos viales.

Hipótesis del estudio

De acuerdo a la revisión del estado del arte para las mezclas asfálticas recicladas en frío realizada sobre la bibliografía que se presenta en este documento, se establecieron las siguientes hipótesis:

- El contenido óptimo de cemento portland en la mezcla se encuentra en un rango definido entre el 1% y 4%.
- El contenido óptimo de agua en la mezcla se encuentra en un rango definido entre el 1.5% y 3%.
- El contenido óptimo de emulsión asfáltica en la mezcla es de 3%.

Metodología del estudio

Inicialmente se realizó una revisión bibliográfica en la que se estableció el estado del arte del tipo de mezcla evaluado mecánicamente en este estudio.

Seguidamente se identificaron los ensayos de mayor pertinencia para caracterizar los materiales que integran la mezcla (esencialmente el RAP).

Luego se fabricaron briquetas de mezcla con un contenido fijo de emulsión asfáltica y diferentes porcentajes de cemento portland y agua, de acuerdo a lo mencionado en la Hipótesis del Estudio. Posteriormente, las briquetas se sometieron a distintos ensayos de resistencia, con lo cual se caracterizó mecánicamente la mezcla.

Lo anterior permitió obtener los órdenes de magnitud para las resistencias que pueden ser alcanzadas con la adición de cemento en la mezcla.

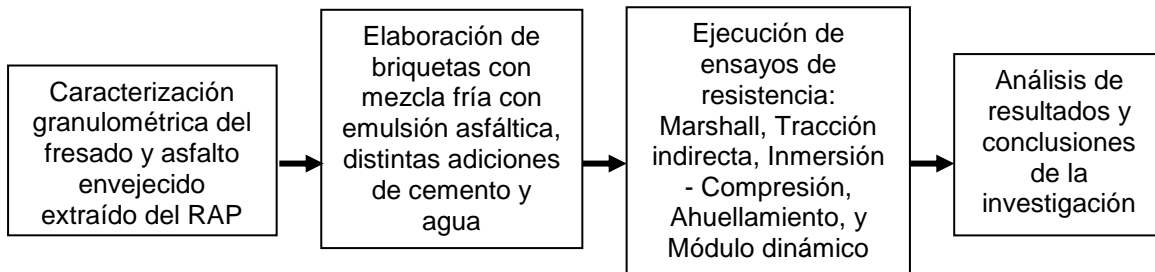
Una vez finalizada la etapa experimental se evaluaron los resultados y se analizaron los cambios que experimentan las mezclas recicladas en frío en función de la adición de cemento, así mismo, se compararon los resultados obtenidos con datos extraídos de diseños convencionales y especificaciones técnicas. La Figura 1 esquematiza brevemente la metodología aplicada en este estudio.

Teniendo en cuenta que el material obtenido del procedimiento de fresado de las carpetas asfálticas puede llegar a tener mucha variabilidad en cuanto a tamaño, composición del material de origen y contenidos de asfalto, será necesario formular

algunas precisiones iniciales para zanjar la etapa experimental, las cuales se relacionan a continuación:

- El agregado de la mezcla será únicamente el obtenido en el procedimiento de fresado, es decir, 100% RAP.
- Se empleará la emulsión asfáltica tipo CRL-1
- El agua de la mezcla provendrá del sistema de acueducto
- El ligante hidráulico a utilizar será el cemento portland tipo 1 sin modificaciones ni adiciones
- El comportamiento mecánico de la mezcla puede estar condicionado por la calidad de los componentes de la misma

Figura 1: Esquema resumido de la metodología de investigación



1.Marco Conceptual

Este capítulo se evalúa los aspectos técnicos y las características de los materiales de la mezcla asfáltica que son objeto de este estudio.

1.1 Definición de la mezcla reciclada en frio y sus componentes

De acuerdo con Díaz, (2005) la mezcla reciclada en frio in situ se define como la extensión y compactación del material resultante del fresado de una o más capas de mezcla asfáltica de un pavimento existente en un espesor comprendido entre 6 y 12 cm, combinado con agua, emulsión asfáltica y otros aditivos, si se requiere. Todo este procedimiento se ejecuta a temperatura ambiente y sobre la superficie que va a ser objeto del tratamiento.

La mezcla asfáltica que será el objeto de este estudio se define como Mezcla Bituminosa Reciclada en Frío más Cemento Hidráulico (MBRF+CH). Esta mezcla estará compuesta en su totalidad por (RAP), que es el material proveniente del procedimiento de fresado; agua, que es muy importante porque le da manejabilidad a la mezcla en el proceso constructivo de la misma, además de reaccionar con el cemento; emulsión asfáltica, la cual una vez se rompe permite ligar los materiales dentro de la mezcla y cemento, que será el material que aporte rigidez a la mezcla.

Seguidamente se presenta la definición individual de cada componente de la mezcla, incluyendo el agregado que para este caso sería RAP; la emulsión asfáltica; el agua de evuelta y el cemento hidráulico.

1.1.1 Pavimento asfáltico reciclado (RAP)

El pavimento asfáltico reciclado es un material que se produce a partir de los procedimientos de fresado de las carpetas asfálticas. En el caso particular de estudio, estos residuos son transportados hasta un lugar de disposición temporal hasta que se requieran para ser reutilizados en estructuras de pavimento nuevas o rehabilitaciones.

Considerando las condiciones mencionadas, se puede inferir que el RAP es un material que tiene una gran heterogeneidad, lo que se traduce en contenidos de asfalto residual y granulometrías variables, con la particularidad de tener generalmente, contenidos de finos muy bajos.

Fabela et al. (1999), menciona en su estudio que por ser el pavimento asfáltico un material con una marcada influencia de la temperatura, el fresado podría facilitarse si se elevara la temperatura de la carpeta asfáltica previamente al procedimiento de corte, no obstante esta práctica no es viable considerando los aspectos relacionados con el medio ambiente y la salud de los trabajadores, así como el enorme incremento en el consumo de energía para transmitirle calor al pavimento objeto del fresado.

Fabela et al. (1999), también relaciona investigaciones donde se afirma que la facilidad de fresar un pavimento está en función de la heterogeneidad de los agregados que componen la carpeta asfáltica que se quiere cortar. Partiendo del hecho de que el diente del rodillo rompe la unión producida por el asfalto entre los agregados pétreos sin que necesariamente se fracture el agregado, por lo que puede inferirse que una mezcla asfáltica con un alto contenido de finos es más difícil de fresar que un pavimento con mayor contenido de partículas gruesas.

La normativa colombiana no establece parámetros de aceptación para el material fresado más que los límites de las curvas granulométricas que especifica El IDU (Instituto de Desarrollo Urbano), para que el RAP pueda ser reutilizado, la cual se muestran en la Tabla 1.

Considerando que el RAP se compone principalmente de cemento asfáltico y material granular que en algún momento conformaron una mezcla asfáltica, la cual después de envejecer fue sometida al procedimiento de fresado, debe caracterizarse desde dos

puntos de vista distintos. El primero será la caracterización granulométrica del RAP, con el objetivo de compararlo con otros agregados utilizados en otro tipo de mezclas y el segundo será la caracterización del asfalto recuperado del RAP, una vez llevado a cabo el debido procedimiento de extracción y recuperación del cemento asfáltico. Esto último con el objetivo de establecer el grado de oxidación del asfalto de la mezcla, con lo cual puede conocerse que tan envejecida se encontraba la mezcla al momento de haber sido fresada.

Tabla 1: Granulometría admisible para el reciclaje de pavimentos

Tamiz		Porcentaje que pasa
[mm]	U.S. Standar	
37.5	1 1/2"	100
25.0	1"	75-100
19.0	3/4"	65-100
9.5	3/8"	45-75
4.75	Nº4	30-60
2.00	Nº10	20-45
0.43	Nº40	10-30
0.075	Nº200	5-20

Fuente: Adaptado de la Tabla 450.1 especificaciones técnicas IDU (2011).

Para caracterizar granulométricamente el RAP se practican los ensayos de rigor que normalmente se realizan sobre agregados vírgenes tales como:

- Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos
- Contenido de humedad del RAP
- Índice de alargamiento y aplanamiento
- Porcentaje de caras fracturadas en los agregados
- Resistencia al desgaste de agregados de tamaño menor a 1 1/2"
- Peso unitario
- Peso específico

Los ensayos de laboratorio anteriormente mencionados suelen practicarse a los agregados que serán empleados en una mezcla con el objetivo de poder contrastar las propiedades evaluadas en cada ensayo con los parámetros establecidos en las normas. Consecuentemente se valida o no, el uso de agregados según se observe su comportamiento a partir de las pruebas de laboratorio, ya que de estos depende en gran manera la resistencia y durabilidad de la mezcla.

Por otro lado, para caracterizar el cemento asfáltico recuperado del RAP se practican los ensayos de rigor que normalmente se realizan sobre cementos asfálticos, los cuales son:

- Contenido de asfalto – Extracción
- Recuperación del asfalto de una solución utilizando el rotavapor
- Peso específico del asfalto
- Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)
- Penetración de los materiales asfálticos
- Ductilidad de los materiales asfálticos
- Viscosidad del asfalto

Según Reyes, (2003) el grado de envejecimiento del cemento asfáltico debido al proceso de mezclado o servicio, puede calcularse en función del porcentaje retenido de la penetración o mediante el índice de envejecimiento, los cuales se calculan como se muestra en la Ecuación 1 y la Ecuación 2 respectivamente

$$\% \text{ retenido de penetración} = \frac{\text{Penetración del asfalto envejecido}}{\text{Penetración del asfalto original}} * 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Índice de envejecimiento} = \frac{\text{Viscosidad del asfalto envejecido}}{\text{Viscosidad del asfalto original}} * 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Estos parámetros generalmente se utilizan para evaluar el envejecimiento de los cementos asfálticos y en el caso particular de las mezclas bituminosas recicladas podrían ayudar a entender el comportamiento mecánico de las mismas.

Es importante entender que las partículas de RAP son granulares de distintos tamaños que aún siguen cohesionados por el efecto del cemento asfáltico y que esta cohesión aun seguirá aportando resistencia en la mezcla bituminosa reciclada. Es por esto que el porcentaje de cemento asfáltico residual del RAP es tenido en cuenta en algunos métodos aplicados para calcular el contenido óptimo teórico de emulsión que debe adicionarse a este tipo de mezcla, conceptos que serán ampliados en secciones posteriores de este documento.

1.1.2 Agua

El agua que se utilizara como parte de la mezcla reciclada provendrá de la red del acueducto de la ciudad de Bogotá.

El rol del agua en la mezcla es muy importante ya que permite contar con la manejabilidad requerida en el procedimiento de mezclado del RAP y en este caso en particular, facilitará la reacción de hidratación del cemento adicionado a la mezcla.

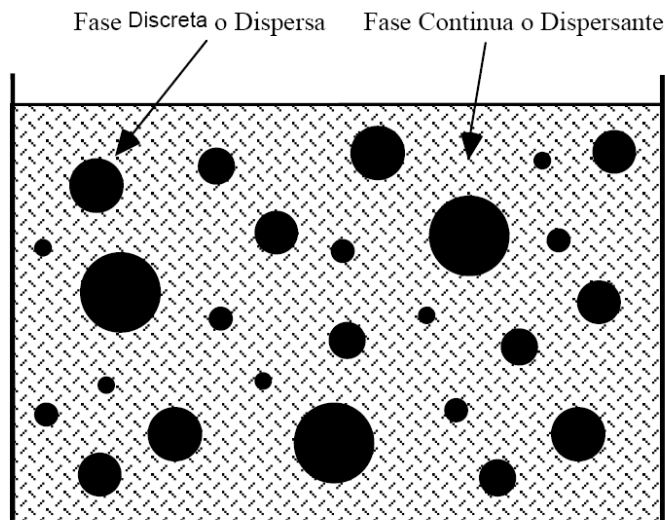
La dosificación del agua para la mezcla se realiza en la mayoría de los casos de manera empírica en el laboratorio, mediante un procedimiento conocido como ensayo de envuelta, en el que se realiza la adición progresiva de agua sobre el RAP hasta que este tenga una apariencia húmeda homogénea, concepto que se ampliará más adelante. Con la aplicación de este procedimiento se termina de establecer cuáles serán los porcentaje óptimos de emulsión asfáltica más agua que deberán añadirse a la mezcla, para seguidamente realizar la compactación de la misma.

1.1.3 Definición de emulsión y emulsiones asfálticas

De acuerdo con Rodríguez et al., (2001) una emulsión se define como una dispersión fina más o menos estabilizada de un líquido en otro, los cuales son no miscibles entre sí y están unidos por un emulsificante, emulsionante o emulgente. Las emulsiones son sistemas formados por dos fases parcial o totalmente inmiscibles, en donde una forma la llamada fase continua (o dispersante) y la otra la fase discreta (o dispersa). Esto puede apreciarse en la Figura 1, en donde se muestra un esquema de una emulsión.

Según la concentración de cada fase se pueden definir dos tipos de emulsiones. La emulsión directa es aquella en la que la fase hidrocarbonada se encuentra dispersa en la fase acuosa y la inversa es en la que la fase acuosa se encuentra dispersa en la fase hidrocarbonada.

En el caso de emulsiones asfálticas, los líquidos no miscibles son el agua y el asfalto. Adicionalmente se tiene el emulgente el cual se deposita en la interface entre el agua y el asfalto y estabiliza la emulsión; éste depende del tipo de emulsión que se requiera.

Figura 2 Esquema de una emulsión

Fuente: Rodríguez et al., (2001)

Dependiendo de su tipo de carga, las emulsiones asfálticas pueden ser catiónicas o aniónicas, tal como se describe a continuación:

- Emulsiones asfálticas aniónicas con carga del glóbulo de asfalto negativa
 - Emulsiones asfáltica catiónicas con carga del glóbulo de asfalto positiva
 - Emulsión asfáltica no-iónica, que es fabricada con emulsificadores no cargados.
- Estas emulsiones no son utilizadas en el reciclado en frío.

Según Mercado et al., (2008) después de un tiempo determinado las emulsiones asfálticas depositan sobre la superficie de aplicación una película de ligante, este fenómeno se denomina rompimiento. Previo al rompimiento, esta se convierte en una emulsión de tipo inverso, ya que los glóbulos de asfalto se concentran para posteriormente perder en su totalidad el contenido de agua, teniendo como resultado una emulsión totalmente rota, incapaz de volver a su estado original aun en presencia de humedad.

Respecto a la estabilidad de las emulsiones asfálticas, éstas se pueden clasificarse en los siguientes tipos:

- **Rompimiento rápido (RR):** Este tipo de emulsiones produce películas resistentes y tienen altas viscosidades para prevenir el escurrimiento y que una vez formada la capa ésta no se despegue con facilidad. Estas propiedades la hacen ideal para aplicaciones de rociado, tales como en bacheos, sellos arenosos y tratamientos superficiales.
- **Rompimiento medio (RM):** Son diseñadas para ser mezcladas con agregados, ya sea en frío o en caliente, y también para el tratamiento de superficies. Estas emulsiones no se rompen inmediatamente al contacto con el agregado, y por esta razón algunas pueden ser utilizadas en una planta y la mezcla resultante transportada al lugar de la pavimentación.
- **Rompimiento lento (RL):** Se emplean para un tiempo máximo de mezcla con los agregados. Su largo tiempo para la manipulación asegura un buen cubrimiento de agregados con un alto contenido de finos. Si se desea aumentar la velocidad de rotura, puede añadirse un pequeño porcentaje de cemento Portland o cal hidratada, durante la producción de la mezcla.

1.1.4 Ligante hidráulico

Los ligantes son aquellos materiales que por medio de una transformación física, química o fisicoquímica son capaces de unir entre sí otros materiales. Se clasifican en dos grandes grupos:

- **Aglomerantes**

Son aquellos ligantes que para unir otros materiales sufren una reacción física bien sea por la evaporación de disolventes, de agua, enfriamiento etc. Algunos de estos materiales son el barro, asfalto, betún, brea, resinas, pegamentos, silicona, plásticos y pinturas entre otros.

- **Conglomerantes**

Para unir materiales sufren una reacción química llamada fraguado. Se subdividen en dos grupos:

- **Aéreos:** si solo fraguan en el aire. A este grupo pertenecen la cal aérea (también conocida como óxido de calcio o cal viva) y el yeso.

- Hidráulicos: fraguan en el aire y en el agua. En este grupo se incluyen la cal hidráulica (también conocida como cal hidratada o hidróxido de calcio) y el cemento.

Conforme a lo anterior el cemento sería un ligante conglomerante hidráulico debido a que su fraguado se da en presencia de agua.

De acuerdo con la Asociación Nacional Técnica de estabilización de suelos y reciclado de firmes (España), los cementos son conglomerantes hidráulicos que cuando son amasados en presencia de agua forman pastas que al fraguar adquieren rigidez mediante reacciones químicas de hidrolisis e hidratación dando lugar a productos mecánicamente resistentes y estables tanto al aire como al agua. Esto se debe a que el cemento portland está formado básicamente por la molienda conjunta del producto de la cocción hasta la sinterización de una mezcla de caliza (carbonatos cálcicos) y arcilla (silicatos de aluminio hidratado), que recibe el nombre de Clinker y de un material empleado como regulador de fraguado que generalmente es yeso dihidratado, los componentes principales del Clinker son la cal, la sílice, el aluminio y el hierro en forma de óxidos.

Existen varias clases de cemento, sus propiedades y características varían dependiendo del porcentaje de dosificación que se aplique de cada materia prima. De acuerdo con la empresa Argos, las clases más comunes en Colombia son:

- Cemento Portland tipo 1: Es el más comercializado en nuestro país, conocido como cemento gris es usado principalmente en estructuras y obras civiles.
- Cemento Portland tipo 1 especial (o modificado): Es considerado un cemento más resistente que el tipo 1, es utilizado generalmente por empresas constructoras.
- Cemento Portland tipo 2: Es un cemento usado generalmente donde hay presencia de sulfatos (ej. zonas cercanas al mar).
- Cemento Portland tipo 3: Es usado generalmente en prefabricados, y donde se requiere un rápido fraguado y buena resistencia.
- Cemento Portland tipo 4: se usa para estructuras grandes como presas de concreto, contiene aceptable resistencia a los sulfatos y a la humedad.

- Cemento Portland tipo 5: Contiene una altísima resistencia a los sulfatos, es esencial para las construcciones que tienen constante contacto con el agua de mar.

1.2 Estado del arte de las mezclas asfálticas frías fabricadas con emulsión asfáltica y cemento portland

Estudios mencionados a continuación, en el campo de las mezclas en frío de pavimentos asfálticos han demostrado que al adicionar cemento portland a este tipo de mezclas se pueden alcanzar mejoras considerables en las propiedades mecánicas de las mismas. Según Needham y Brown, (2000) estos estudios centran sus objetivos investigativos en entender los mecanismos que gobiernan las mejoras en los comportamientos mecánicos de las mezclas recicladas en frío y en cuantificar esas mejoras.

De acuerdo con Oulahna et al., (1996) al adicionar cemento a la mezcla se producen una serie de reacciones químicas que pueden relacionarse en tres fases:

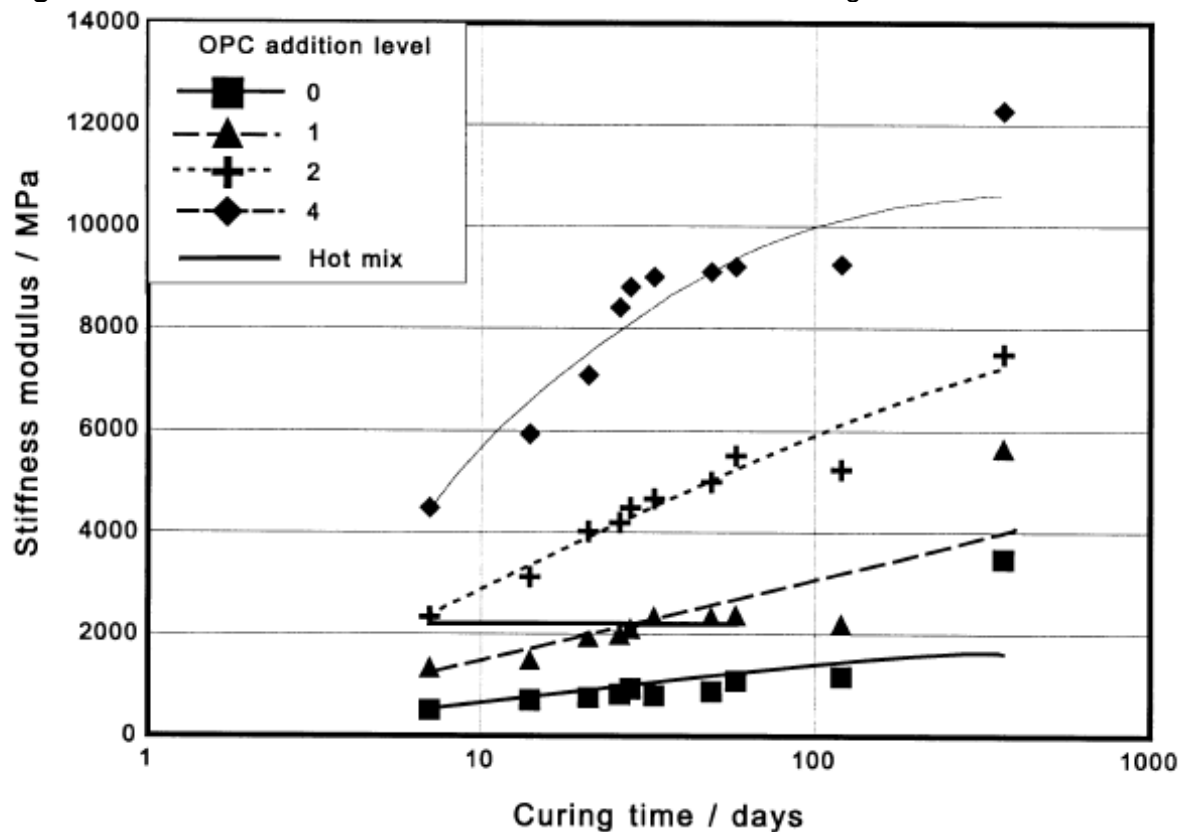
- Fase 1: Hidratación del cemento, que es una reacción entre el cemento y el agua
- Fase 2: Rotura de la emulsión debido al empleo del agua
- Fase 3: El asfalto producido en el proceso de rotura de la emulsión se deposita en los cristales de cemento hidratado, posteriormente los glóbulos de asfalto comienzan a unirse entre sí.

Consecuentemente los resultados de la investigación de Needham y Brown, (2000) muestran que se produce un proceso de hidratación del cemento y que parte de este cemento actúa como ligante al mezclarse con el asfalto. Esta pasta o masa que se genera da lugar a mejoras en tres propiedades mecánicas claves como son módulo de rigidez, resistencia a deformación permanente y resistencia a fatiga, debido a este efecto multiplicador sobre la capacidad ligante de la emulsión que ejerce el cemento.

En la Figura 3 se observa la influencia de la adición OPC (*Ordinary Portland Cement*), o cemento Portland ordinario en el módulo de rigidez de las mezclas asfálticas en frío fabricadas con emulsión, donde se resalta principalmente que el módulo de rigidez de las mezclas con emulsión muestra una ganancia progresiva de resistencia durante varias

semanas de curado, en contraste con la mezcla en caliente que no presenta cambios discernibles. Así mismo la tasa de incremento en la rigidez de las mezclas con emulsión aumenta con el nivel de cemento adicionado, mientras que en la mezcla en caliente la adición de cemento no tiene ningún efecto en el comportamiento mecánico.

Figura 3: Efecto del cemento Portland sobre el módulo de rigidez de mezclas frías



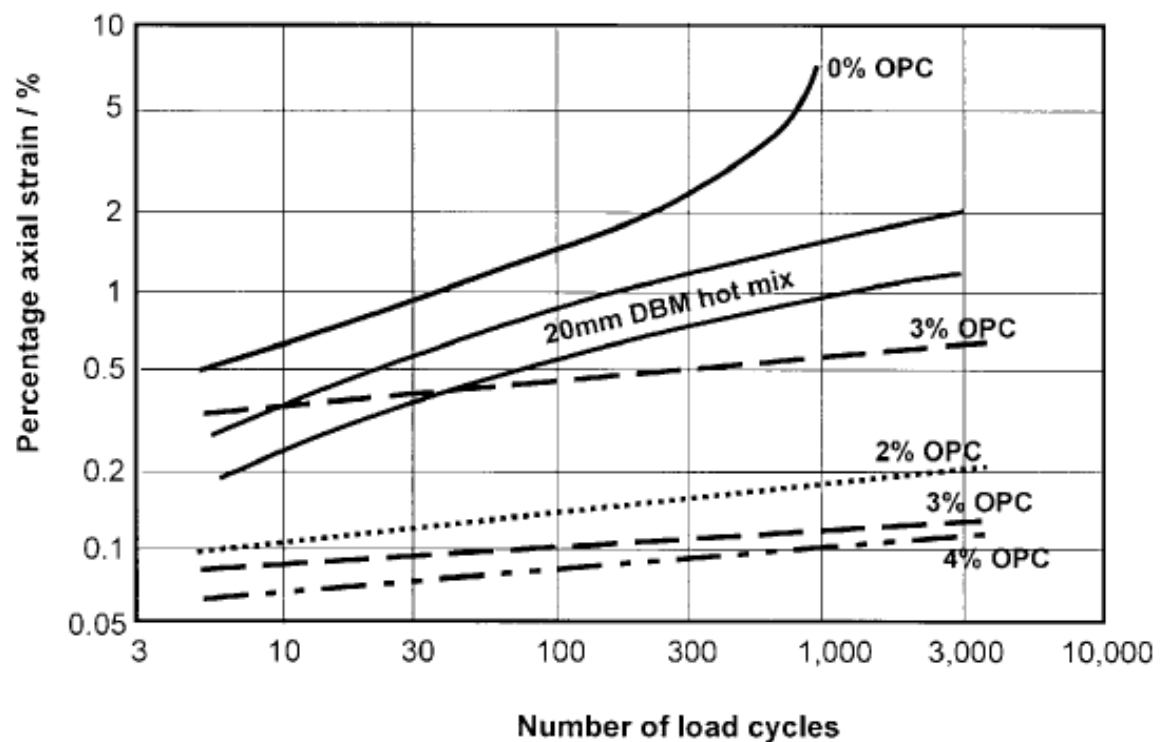
Fuente: Needham y Brown, (2000)

La Figura 4 muestra un comportamiento favorable de las mezclas fabricadas con emulsión asfáltica, ya que la resistencia a la deformación permanente se incrementó por la adición de cemento, mientras que esta adición tuvo un efecto negativo en las mezclas en caliente. Además, las mezclas en frío que no contenían cemento fallaron después de ser sometidas a menos de 1000 ciclos de carga, indicando que las mezclas en frío sin adición presentan una resistencia pobre a la deformación permanente.

La Figura 5 deja ver que por encima de las 200 microdeformaciones, la adición de cemento causó una reducción en la resistencia a la fatiga, mientras que por debajo de

200 microdeformaciones ocurrió lo contrario. Los niveles de deformación que pueden darse en una estructura de pavimento están por debajo de 200 microdeformaciones y el valor real está en función de variables tales como la mezcla, rigidez de la subrasante, las cargas y el espesor de capa. Puede entonces afirmarse que los datos que se encuentran por debajo de las 200 microdeformaciones son de mayor interés para fines prácticos. Por lo tanto, la adición de cemento extiende claramente la resistencia a la fatiga.

Figura 4: Efecto del cemento Portland sobre la resistencia a la deformación permanente de mezclas frías



Fuente: Needham y Brown, (2000)

Para el ensayo de fatiga las microdeformaciones evaluadas obedecerían a microdeformaciones axiales permanentes, que según Leiva (2004) se calculan mediante la Ecuación 3.

$$\varepsilon_{Pax} = \frac{1000000 * D_{i-max}}{GL_{ax}}$$

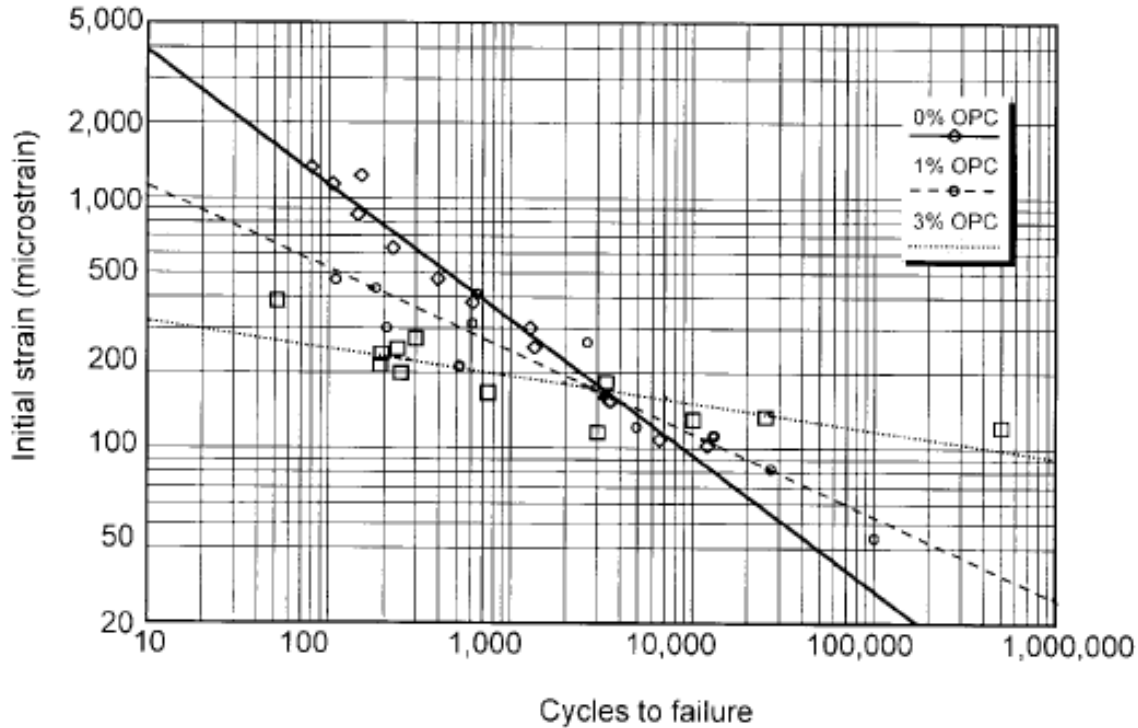
Ecuación 3

Dónde:

D_{i-max} = Desplazamiento máximo [mm]

GL_{ax} = longitud del indicador axial [mm]

Figura 5: Efecto del cemento Portland sobre la resistencia a la fatiga de mezclas frías



Fuente: Needham y Brown, (2000)

Según se describe en los párrafos subsiguientes, otros autores a partir de sus estudios, también llegan a la conclusión que la adición de cemento en pequeñas cantidades a la mezcla fría, permite seguir manteniendo las propiedades flexibles de un material tratado con ligante bituminoso a la vez que se complementa con las de un ligante hidráulico, tales como conseguir que la mezcla adquiera resistencia mucho antes y sea menos susceptible al agua.

Según Potti et al., (2004) la incorporación de una pequeña cantidad de cemento permite disminuir el contenido de agua de la mezcla y por lo tanto, aumentar su densidad. Este autor también señala en su estudio que el aspecto clave influenciados por la adición de cemento portland es el comportamiento inicial, representado en el aumento de cohesión de la mezcla.

De acuerdo con Oruc y Celic, (2006) las propiedades de las mezclas asfálticas frías mejoran considerablemente al adicionar cemento portland en porcentajes del orden del 6%. Consecuentemente en la investigación de Niazy y Jalili, (2009) analizaron el efecto del cemento portland y la cal como material de adición, en la propiedades mecánicas de mezclas recicladas frías con emulsión asfáltica, comprobando que al adicionar cemento portland, la estabilidad Marshall se incrementa entre el 20% y 50% y en la misma medida el módulo elástico, la resistencia a la tracción indirecta y la resistencia a la deformación plástica.

Más recientemente Reyes-Ortiz et.al., (2012) realizan una investigación con granulometrías colombianas para mezclas frías elaboradas con materiales pétreos vírgenes, emulsiones asfálticas y adiciones de cemento. Encontrando que las mezclas de este tipo sin adiciones presentan resistencias muy bajas, no cumpliendo con las especificaciones establecidas en la normativa. Al adicionar cemento observan incrementos de resistencia hasta del 100% para tracción indirecta, 60% para módulo resiliente y 80% para resistencia conservada.

1.2.1 Diseño de mezclas asfálticas frías utilizando pavimentos reciclados

Las metodologías de diseño desarrolladas de manera empírica, principalmente para el diseño de mezclas asfálticas frías, se centran en primera instancia en el cálculo del contenido óptimo teórico de emulsión asfáltica que debe agregarse a la mezcla. Éste muchas veces se obtiene en función de la superficie específica de los agregados de la mezcla, lo cual necesariamente implica la caracterización inicial de los materiales que se van a utilizar en la mezcla, tal y como se expuso en la sección 1.1.1.

Luego de definir los contenidos de agua y emulsión de la mezcla, se procede a fabricar las briquetas con la mezcla ya definida, que posteriormente serán sometidas a esfuerzos que pueden ser suministrados de manera diametral o axial según sea el caso de cada ensayo. Además, estas briquetas se someten a condiciones desfavorables de humedad y temperatura, con el objetivo de evaluar la susceptibilidad de la mezcla frente a estas variables.

Martínez-Echeverría, (2012) en su tesis doctoral relaciona los métodos más utilizados para la determinación de la fórmula de trabajo, a emplear en los procedimientos de reciclaje de pavimento asfáltico in situ con emulsión asfáltica. Estas metodologías se resumen en el Anexo A.

1.2.2 Metodologías de diseño de mezclas bituminosas recicladas aplicadas en Bogotá D.C.

El ensayo de Inmersión-Compresión recogido en la norma INV E- 738, permite determinar la pérdida de cohesión por acción del agua en mezclas bituminosas compactadas mediante amasado. Luego de someter seis briquetas a esfuerzos de compresión (3 curadas en seco y 3 curadas sumergidas), se aplica la Ecuación 4.

$$\text{Índice de resistencia conservada} = \frac{R_2}{R_1} * 100 \quad \text{Ecuación 4}$$

Siendo:

R_1 =resistencia a la compresión de especímenes secos (Promedio del grupo 1)

R_2 =resistencia a la compresión de briquetas sumergidas (Promedio del grupo 2)

Así mismo, el ensayo de Tracción Indirecta descrito en la norma INV E-785 emplea briquetas compactadas por golpes que son sometidas a curado al aire y sumergido, lo que permite conocer la resistencia conservada de la mezcla, la cual se estima mediante la Ecuación 5:

$$RRT = \frac{R_{th}}{R_{ts}} * 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde:

RRT= relación de resistencia a la tensión en porcentaje

R_{th} =resistencia promedio a la tensión del subgrupo acondicionado al agua

R_{ts} =resistencia promedio a la tensión del subgrupo seco

Se establece una resistencia mínima de las mezclas recicladas en frío de 2000 kPa, para probetas curadas en seco y una resistencia conservada mínima de 75% obtenidas en el

ensayo de Inmersión-Compresión, con el objetivo de determinar el porcentaje óptimo de ligante.

Si se utiliza el ensayo de tracción indirecta, deberán considerarse, para la elección del contenido óptimo de ligante, unos valores mínimos para la resistencia de probetas curadas en seco de 250 kPa y una resistencia conservada mínima de 50% tras curado húmedo.

Particularmente para el caso de Bogotá se mencionan en esta investigación, tres estudios en los que se relaciona material fresado y emulsiones asfálticas como parte del diseño de una mezcla que es utilizada como componente de una estructura de pavimento.

El primer estudio se refiere al diseño elaborado por la empresa Auscultar Ltda, denominado “Estudio geotécnico y diseño de pavimentos, cll 31 sur – cll 29sur – Kr 8ae – kr51 y cll 31 b sur, Quiroga La Ye – San Pedro – Libertadores – Marruecos y Quiroga I sector, Contrato IDU – 071 – 2008”, en donde se puede observar que se empleó la metodología de Duriez para estimar el contenido óptimo teórico de emulsión asfáltica de la mezcla. Posteriormente se realizaron pruebas Marshall con briquetas curadas durante 7 días al aire y también sumergidas.

El segundo estudio lo realiza un año después la misma firma de ingeniería que elaboró el estudio relacionado anteriormente, utilizando la misma metodología de Duriez para el cálculo inicial del porcentaje de emulsión, pero esta vez sometiendo las briquetas curadas al aire y sumergidas al ensayo de compresión (INV E-738).

Finalmente el tercer estudio es realizado por la empresa Bateman Ingeniería Ltda, para la rehabilitación de vías ubicadas en la localidad de Suba y en donde se utiliza el ensayo de Proctor modificado para evaluar la humedad óptima de compactación para el RAP y así establecer el contenido de agua en la mezcla. Se empleó el ensayo de inmersión-compresión (INV E-738) escogiendo seis porcentajes distintos de emulsión asfáltica para realizar las briquetas y así determinar cuál es el contenido óptimo de emulsión.

1.2.3 Revisión de experiencias en estudios de mezclas frías para la determinación de contenidos óptimos de agua y emulsión asfáltica

A continuación se presenta una recopilación de experiencias en estudios que involucran mezclas asfálticas frías, la cual sirvió como fundamento teórico principal en la determinación del contenido óptimo de fluidos de compactación, que corresponde a la suma de emulsión y agua a incorporar a las mezclas que se pretenden fabricar en este estudio.

De acuerdo con lo expuesto por Díaz, (2005) para encontrar el contenido óptimo de emulsión asfáltica + agua, en su estudio se recurrió a una primera aproximación a estos valores mediante dos etapas iniciales, que se resumen a continuación:

En la primera etapa se emplearon 4 contenidos de agua de 0%, 0.5%, 1% y 1.5% para la fabricación de briquetas, realizando la compactación de estas en un compactador giratorio para posteriormente someterlas al ensayo de tracción indirecta. Después dentro de la misma etapa se realizó ensayos Proctor Estándar con contenidos de agua de 0%, 1%, 2%, 3% y 4% y así determinar la humedad óptima en función de la densidad. De la primera etapa de ensayos se concluyó que los porcentajes óptimos de fluidos de compactación obtenidos del ensayo de tracción indirecta se encuentran entre 1.5% y 3%, y para el ensayo de Proctor estándar sería de 4%. En la segunda etapa se utilizó un porcentaje de 3% de emulsión asfáltica como aproximación al valor óptimo de fluidos de compactación, combinado con contenidos de agua de 0.5%, 1.5% y 3.0% teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la primera etapa de aproximación. Se concluyó que el porcentaje óptimo de fluidos de compactación sería del 4.5%, con un 3% de emulsión asfáltica. El contenido de emulsión se corroboró mediante la fabricación de nueve briquetas más con contenidos variables de emulsión (2%, 1.5% y 1%) y agua (2.5%, 3% y 3.5%) correspondientemente, respetando el valor óptimo de fluidos de compactación de 4.5%.

Botasso et al., (2008) presenta una investigación donde se elaboraron mezclas parecidas a las que se pretende desarrollar en este estudio, agregando distintos porcentajes de cal a mezclas compuestas de RAP y emulsión asfáltica, para después someterlas al ensayo *Wet track abrasión test* (WTAT) que consiste en una manguera de neopreno que con una

determinada presión se aplica sobre la superficie de la briqueta con un movimiento de rotación y de traslación, estando aquella cubierta de agua. La metodología de este ensayo se orienta a que una vez fijado un porcentaje de emulsión inicial y el porcentaje de agua adicional para la consistencia correcta de la mezcla, esta debe someterse a una sollicitación, que en lo posible anticipe la que soportará en su vida en servicio. En este estudio se observa que se emplearon contenidos de fluidos de compactación de 15% y 16%, correspondientes a 7% de agua y 9% de emulsión, y 8% de agua y 7% de emulsión. Los resultados del ensayo (WTAT) muestran que al utilizar un contenido de fluidos de compactación de 16% se tiene mejores resultados en el comportamiento de resistencia de la mezcla.

Needham y Brown, (2000) en su estudio del comportamiento de mezclas asfálticas en frío con agregado virgen y diversos contenidos de cemento, incorpora contenidos de fluidos de compactación de 10% y 11%, siendo el contenido de emulsión fijo de 8% y el del agua variable entre 2% y 3%.

Sarmiento (2012) presenta una investigación en la que estima un contenido óptimo de emulsión asfáltica de 9.5% y un contenido de agua de envuelta de 4% para la compactación de la mezcla que emplea agregado virgen.

Martínez-Echeverría, (2012) resume las fórmulas de trabajo utilizadas en diversos casos de estudio ocurridos en carreteras de la región de Andalucía en España, donde se realizaron rehabilitaciones empleando técnicas de reciclaje de pavimento in situ en frío, resaltando que las fórmulas de trabajo eran muy parecidas entre sí, tal como se observa en la Tabla 2:

Tabla 2: Contenidos óptimos de emulsión, agua y cemento obtenidos en rehabilitaciones de carreteras de Andalucía – España.

Proyecto		Contenido óptimo de emulsión [%]	Contenido óptimo de agua [%]	Cemento [%]
Refuerzo de la carretera A-431. Tramo PK 0+000 al PK 58+000. (Córdoba).	Fórmula 1	3.0	2.5	-
	Fórmula 2	3.5	3.5	-
Refuerzo del firme de la carretera A- 7204 (Málaga)		3.0	2.3	-
Renovación del firme de	Fórmula 1	3.5	2.0	-

Proyecto		Contenido óptimo de emulsión [%]	Contenido óptimo de agua [%]	Cemento [%]
la A-351 del P.K. 0+000 al P.K. 34+700 (Écija- Osuna).	Fórmula 2	3.5	2.0	0.5
Renovación del firme de la A-472 del P.K. 0+000 al P.K. 60+830 (Sanlúcar la Mayor- San Juan del Puerto)		3.5	2.8	1.0
Renovación de la avenida kansas city. Sevilla		3.2	2.2	-

Fuente: Adaptada de Martínez-Echeverría, (2012)

Finalmente Pérez, (2003) compila las experiencias obtenidas en algunas ciudades de Estados Unidos como parte de un plan piloto de investigación sobre el desarrollo de un método de diseño de mezclas basado en la puesta en obra. Se dispuso un diseño volumétrico puesto en práctica utilizando el compactador giratorio *Superpave* con el RAP de Kansas, Ontario y Connecticut.

Los datos de este procedimiento fueron usados para determinar el contenido óptimo de emulsión. Una vez decidido el OEC (*optimum emulsion content*), dos probetas con diferente contenido de agua por encima y por debajo del 3% fueron fabricadas. Un proceso similar fue utilizado para determinar el contenido óptimo de agua. Los resultados obtenidos para el contenido óptimo de fluidos de compactación para cada ciudad se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Contenido óptimo de fluidos de compactación obtenidos en el plan piloto de investigación (USA)

Ciudad	Contenido óptimo de emulsión [%]	Contenido óptimo de agua [%]
Kansas	1.4	3
Ontario	1.2	2.1
Connecticut	1.2	3

Fuente: Adaptada de Pérez, (2003)

Thenoux y García, (2001) presentan una investigación en la que realizan ensayos Marshall modificado sobre mezclas frías elaboradas a partir de RAP y distintos tipos de emulsión asfáltica, utilizando un porcentaje de agua de envuelta del 3% y contenidos de emulsión asfáltica de 1.7% y 2.2%.

Los estudios realizados en Bogotá D.C. para diseños de mezcla fría utilizando RAP consideraron la metodología de Duriez para hallar el contenido óptimo teórico de emulsión asfáltica, así como el ensayo visual de agua de envuelta para determinar el contenido de agua que debe adicionarse a la mezcla. En la Tabla 4 se relacionan los contenidos de agua y emulsión considerados en estos estudios.

Tabla 4: Contenido óptimo de fluidos de compactación obtenidos para estudios en la ciudad de Bogotá

Empresa	Contenido óptimo de emulsión [%]	Contenido óptimo de agua [%]
Auscultar LTDA	5.0	3.0
Auscultar LTDA	6.0	2.5
Bateman Ingeniería LTDA	5.5	5.4

Luego de la revisión de estos documentos técnicos es posible inferir acertadamente que el asfalto envejecido presente en el RAP, continuaría aportando cohesión en la mezcla asfáltica que se fabrique a partir de este material. Esto es, considerando que los porcentajes óptimos de emulsión asfáltica requeridos en las mezclas que contienen RAP, son significativamente más bajos que los requeridos cuando se usa material virgen.

El orden de magnitud de los contenidos óptimos de emulsión asfáltica, utilizados en las mezclas frías con RAP, varan entre 1.2% y 6.0%. Mientras que los utilizados en mezclas frías con agregado pétreo están en un rango entre el 7.0% y 9.5%

Esto mismo se puede constatar en la numeral 1.2.1, donde se observa que algunos métodos de diseño de mezclas asfálticas frías que usan pavimento reciclado, consideran el porcentaje de asfalto del RAP para el cálculo del porcentaje óptimo de emulsión.

1.2.4 Revisión de experiencias en estudios que emplean la adición de cemento en mezclas asfálticas frías

Existe una gran cantidad de investigaciones que demuestran la viabilidad técnica de usar cemento, como material de adición en la fabricación de mezclas asfálticas frías, en la medida que aporta generosamente resistencia a la mezcla y ayuda a que disminuya la susceptibilidad frente al efecto adverso que tiene el agua, cuando la mezcla se somete a un curado sumergido. Dicho esto, la viabilidad que debe demostrarse en adelante no

solamente sería técnica, sino también económica, con el objetivo de convertir el uso de este tipo de mezclas amigables con el medio ambiente, en mezclas amigables con los costos. Es por ello que debe tratarse de establecer unos contenidos óptimos de cemento que maximicen el aporte de resistencia a la mezcla y al mismo tiempo impidan que se gasten recursos innecesariamente, considerando que el cemento es un material costoso. A continuación se relacionan algunas experiencias obtenidas en otras investigaciones que involucran el uso de cemento como adición en la elaboración de mezclas frías, lo cual fue considerado como insumo principal en la determinación de los porcentajes de cemento empleados en esta investigación.

Needham y Brown, (2000) en su estudio del comportamiento de mezclas asfálticas en frío con agregado virgen, sugieren el uso de cinco porcentajes distintos de adición de cemento entre 0% y 4%, con los cuales confeccionan briquetas para someterlas a ensayos de tracción indirecta, fatiga y módulo dinámico.

Díaz, (2005) utiliza porcentajes de cemento de 1%, 2% y 3% en su estudio de mezclas frías con RAP, así como distintos porcentajes de cal: 0.5%, 1% y 1.5%. No obstante en este estudio se encuentra que el uso de cal no beneficia a la mezcla en ganancia de resistencia ni disminución de las deformaciones.

Montepara y Giuliani, (2001) en su estudio del rol del cemento en las mezclas frías estabilizadas con emulsiones asfálticas, afirma que utilizar porcentajes mayores a 2% de cemento como adición en este tipo de mezclas, además de ser antieconómico, podría producir un efecto de retracción indeseado en la mezcla ya que ocasionaría la aparición de fisuras.

Sarmiento (2012), presenta un análisis económico comparativo entre mezclas asfálticas calientes y frías, que emplean agregados pétreos vírgenes encontrando que al utilizar mezclas frías se puede llegar a un ahorro de 35 millones de pesos aproximadamente por kilómetro. Así mismo, resalta que debido a las características mecánicas de las mezclas en frío, este análisis económico está restringido a las vías secundarias y terciarias.

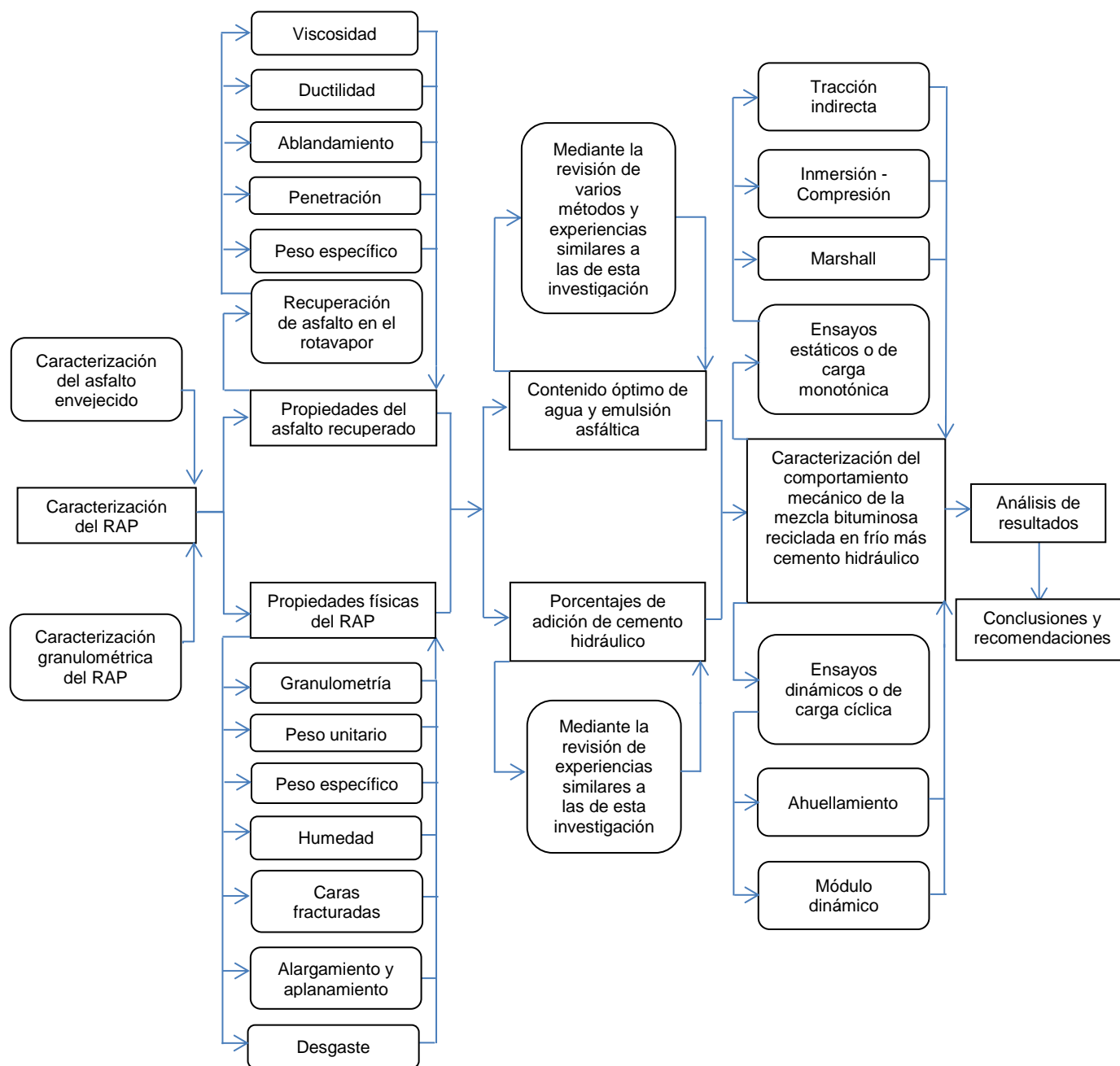
2. Campaña experimental

La campaña experimental que se realizó comprendió en primer lugar, la caracterización granulométrica del fresado mediante la aplicación de algunos ensayos para la determinación de las propiedades físicas de este material para su uso como agregado. En esta misma etapa de la investigación se realizó la recuperación del asfalto envejecido del RAP mediante la extracción por centrifugado con el solvente cloruro de metileno y posterior separación de solvente y asfalto en el equipo de Rotavapor. Al asfalto recuperado se le practicaron los ensayos de caracterización de rigor para establecer su grado de envejecimiento.

En una etapa posterior a la caracterización del RAP, se procedió a establecer los contenidos óptimos teórico de agua y emulsión asfáltica que serían utilizados en la fabricación de la mezcla, mediante la aplicación de las ecuaciones empíricas de los métodos estudiados en la revisión bibliográfica y que son comúnmente utilizados para tales fines. Así mismo se tuvieron en cuenta las experiencias registradas en estudios afines a esta investigación. En esta misma etapa se decidieron los porcentajes de cemento hidráulico que se iban a adicionar a la mezcla para evaluar la evolución en su comportamiento mecánico. Finalmente se estableció cuáles serían los ensayos pertinentes a realizar para caracterizar mecánicamente el comportamiento de la mezcla

En la siguiente etapa se realizaron los ensayo de resistencia que aplican cargas estáticas y dinámicas a las briquetas preparadas con la mezcla bituminosa reciclada en frío con adiciones de cemento hidráulico (MBRF+CH).

Para la puesta en marcha de la campaña experimental se consideró la metodología que se resume convenientemente en la Figura 6, la cual esquematiza un diagrama de flujo que muestra las etapas de los estudios experimentales y los ensayos practicados.

Figura 6: Diagrama de flujo de la metodología de la campaña experimental

En la etapa final del estudio se realizó el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia, observando la evolución del comportamiento de la mezcla al agregar distintos contenidos de cemento y compararlos con la mezcla que no tuvo adiciones. Así mismo se realizó la comparación con resultados obtenidos en otras investigaciones y diseños de mezcla con el objetivo de determinar la conveniencia de utilizar el cemento como adición en una mezcla reciclada.

La campaña experimental se llevó a cabo en tres laboratorios distintos a saber: Laboratorio del Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia, donde se realizaron los ensayos de caracterización granulométrica del RAP y del asfalto envejecido que se recuperó del mismo material, así como los ensayos de ahuellamiento. En el Laboratorio de la Planta de Asfalto Concrecol, se realizaron los ensayos de Estabilidad-Flujo (Marshall), Tracción Indirecta y Compresión-Inmersión, así mismo se elaboraron las briquetas para el ensayo de módulo dinámico y las panelas para el ensayo de ahuellamiento. Finalmente en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes se realizaron los ensayos de módulo dinámico.

Para adicionar cemento a la mezcla se adquirió en un depósito de materiales de construcción el cemento portland ordinario tipo 1. En la Tabla 5 se muestran las propiedades físicas del cemento portland tipo 1.

Tabla 5: Propiedades físicas del cemento portland tipo 1

Propiedad	Unidades	Valores de referencia NTC 121	Valores
Fraguado inicial ⁽¹⁾ , mínimo	[minutos]	45	45
Fraguado inicial ⁽¹⁾ , máximo	[minutos]	480	420
Expansión autoclave, máximo	[%]	0.8	0.8
Expansión en agua ⁽²⁾ , máximo	[%]	-	0.02
Resistencia a 3 días ⁽³⁾ , mínimo	[MPa]	8	9
Resistencia a 7 días ⁽³⁾ , mínimo	[MPa]	15	16
Resistencia a 28 días ⁽³⁾ , mínimo	[MPa]	24	26

⁽¹⁾ Ensayo con aguja de Vicat según NTC 118 (ASTM C191)

⁽²⁾ Ensayo en Barras de mortero a 14 días según NTC 4927 (ASTM 1038)

⁽³⁾ Ensayo a compresión sobre cubos de mortero con arena normalizada según NTC 220 (ASTM C109)

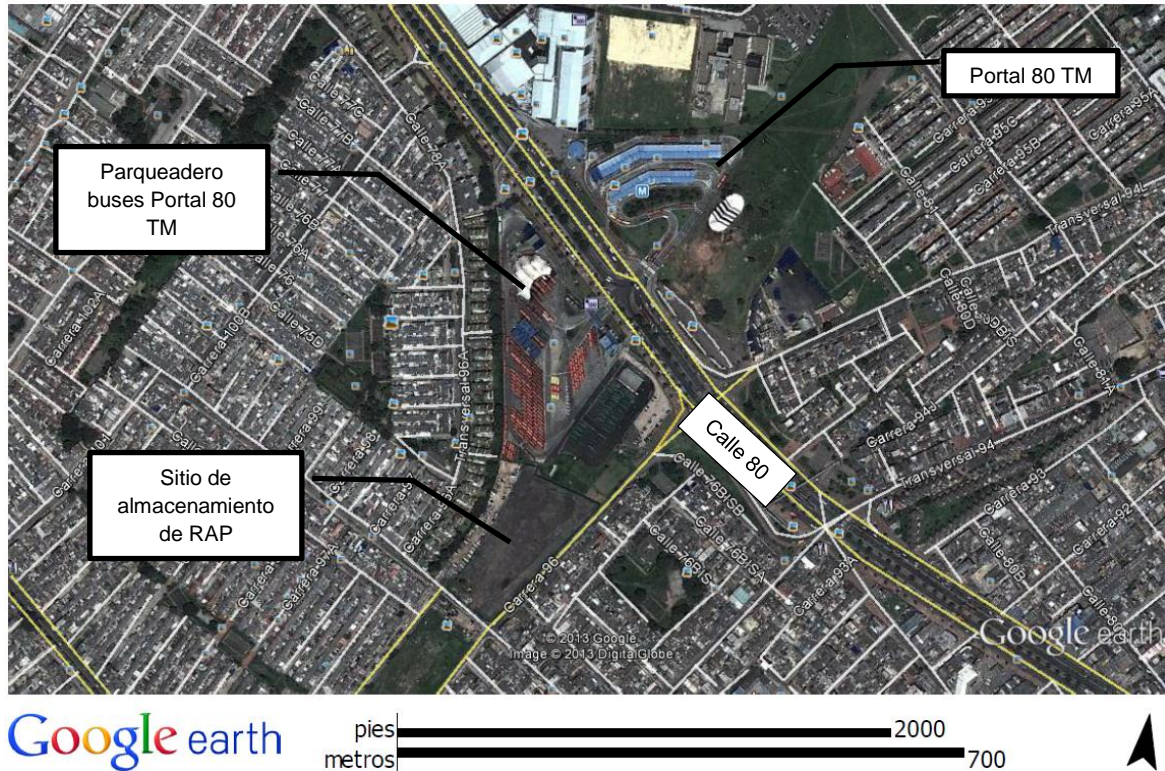
Fuente: Adaptada de Ficha técnica para cemento gris de uso general, ARGOS (2010).

El agua que se utilizó en el mezclado de los materiales que componen la mezcla se extrajo directamente del suministro de sistema de acueducto de la ciudad de Bogotá, la cual es de carácter potable.

El RAP que se utilizó en la campaña experimental, se obtuvo directamente del sitio de disposición temporal de agregados reciclados de pavimento asfáltico, donde el IDU (Instituto de Desarrollo Urbano) los almacena hasta que sean requeridos para su utilización. Este sitio se localiza en la Carrera 96 con Calle 75, justo detrás del

parqueadero de los buses de Transmilenio del portal 80. La localización detallada se muestra en la Figura 7.

Figura 7: Sitio de disposición temporal de RAP.



Fuente: Google earth (2013)

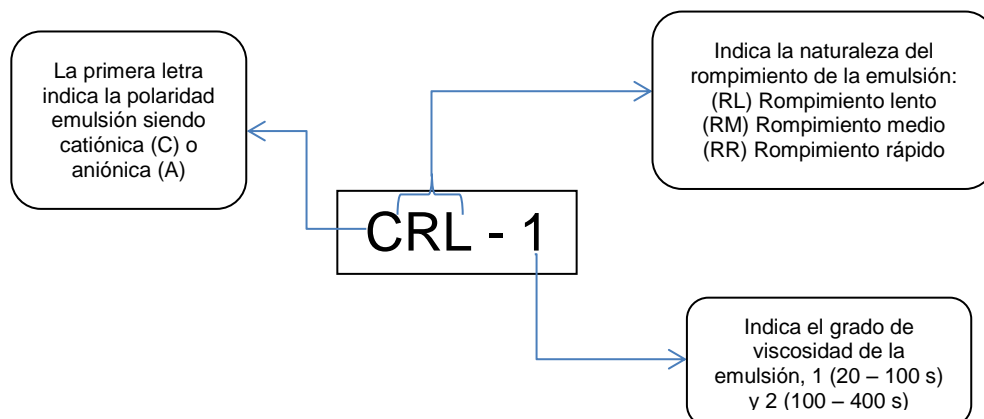
Se obtuvieron aproximadamente 400 kg de material fresado como muestra representativa de un lote de material fresado, que según se nos informó en el momento de la toma de la muestra, provenía del Barrio San Francisco, en el suroriente de la ciudad. Posteriormente se procedió a almacenar la muestra en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia. La Fotografía 1 muestra el lote del IDU y el lote de material de donde se obtuvo el fresado para el desarrollo de la investigación.

Fotografía 1: Obtención de muestras de RAP en el lote de IDU

2.1 Caracterización de la emulsión asfáltica

Como ya se había mencionado inicialmente, la emulsión asfáltica que se va a emplear en la investigación es una CRL-1, debido a que este es el tipo de emulsión que se utiliza generalmente en los procedimientos de reciclaje de pavimento asfáltico en frío in situ en la ciudad de Bogotá. La Figura 8 muestra la interpretación de la nomenclatura de la emulsión utilizada en esta investigación.

Según el fabricante de la emulsión asfáltica empleada en esta investigación, cuando se ha utilizado un asfalto duro, esto es de penetración 40-50 a 77°F (25°C) en la manufactura de la emulsión, suele colocarse la letra h como sufijo en la nomenclatura. Cuando no aparece la letra h se sobrentiende que se ha utilizado un asfalto con penetración entre 100-200 décimas de milímetro.

Figura 8: Nomenclatura para identificación de la emulsión asfáltica

La emulsión CRL-1 es una emulsión catiónicas de rompimiento lento, la cual es empleada generalmente en el procedimiento de estabilización de material fresado en la ciudad de Bogotá. En la Tabla 6 se muestran las propiedades físicas de la emulsión asfáltica CRL-1.

Tabla 6: Propiedades físicas de la emulsión asfáltica CRL-1

Propiedad	Unidades	Norma de referencia INVIAS	Valores	
			Mínimo	Máximo
Viscosidad - Saybolt Furol 25°C	[s]	E-763	-	200
Destilación - contenido de asfalto residual	[%]	E-762	57	-
Contenido de disolventes	[%]		-	0
Tamizado - retenido en el tamiz n°20, 850µm	[%]	E-765	0	-
pH		E-768	-	6
Penetración - @ 25°C, 5gr, 5s	[1/10 mm]	E-706	60	100
ductilidad @25°C, 5cm/min	[cm]	E-702	40	-
solubilidad en tricloretileno	[%]	E-713	97	-

Fuente: Adaptada de Ficha técnica para emulsiones asfálticas, Manufacturas y Procesos Industriales (MPI) Ltda, (2008).

2.2 Caracterización del RAP

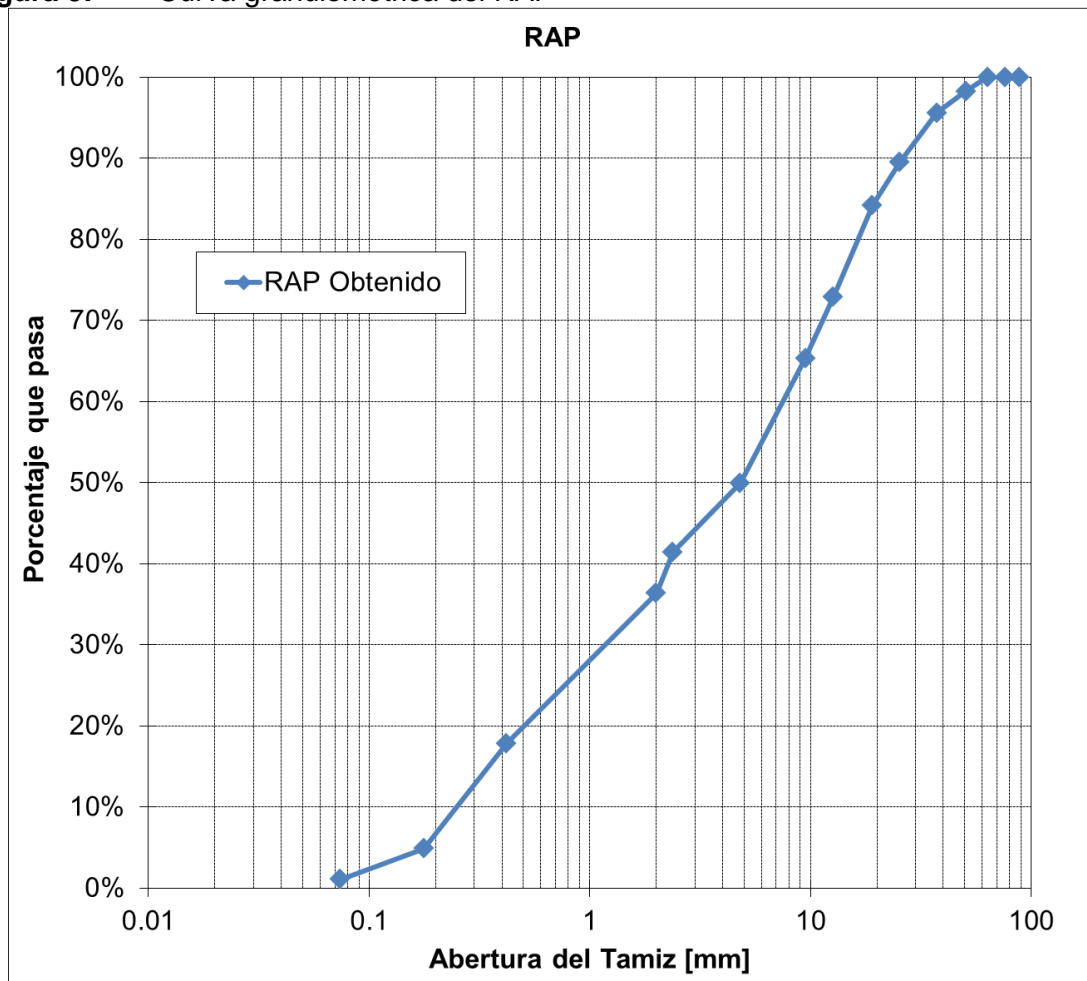
2.2.1 Caracterización granulométrica del RAP

A continuación se presentan lo ensayos realizados para la definir las propiedades de los agregados obtenidos del fresado:

▪ Análisis granulométrico de agregados (INV E-213)

Para la ejecución de este ensayo se emplearon 7400 gr aproximadamente de RAP, obtenido a partir de procedimiento de cuarteo especificado en la norma. Se determinó que el porcentaje de gravas era del 50.1%, arenas 48.8% y finos 1.1%, por lo que se tiene una clasificación USCS: GW – Grava bien gradada. Además el tamaño máximo del agregado es de 2". La curva granulométrica del RAP obtenido se muestra en la Figura 9.

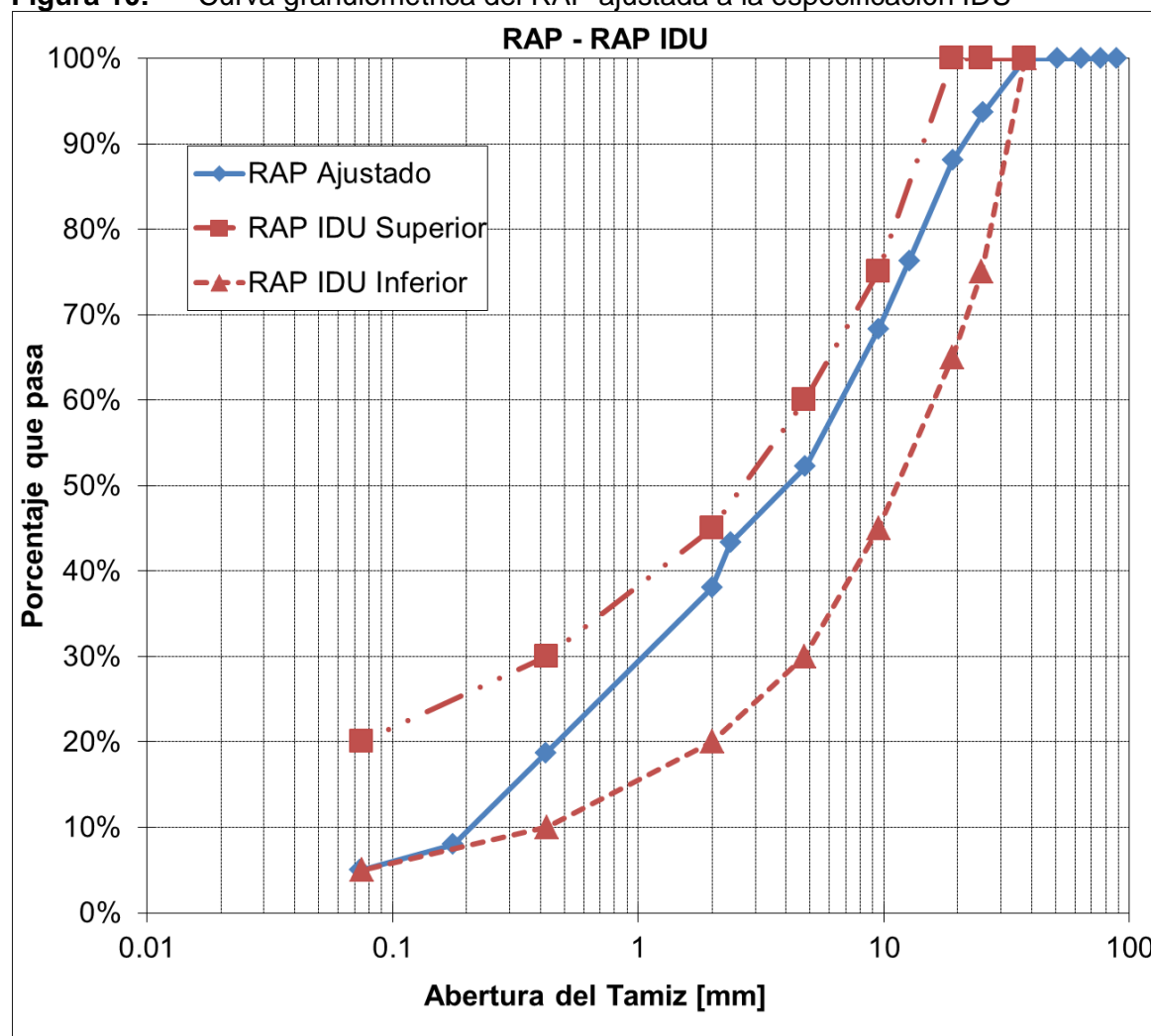
Figura 9: Curva granulométrica del RAP



Considerando que los resultados del ensayo de granulometría, contrastados con los requerimientos de las especificaciones técnicas del IDU para reciclaje de pavimentos, muestran la presencia de sobre tamaños en el agregado (<1") y deficiencia en porcentaje de tamaños entre el tamiz #80 y el #200, se realizó una modificación a la granulometría

con el objetivo de ajustarla a la que normalmente se utiliza en este tipo de mezclas. La curva granulométrica que se utilizó en el ajuste corresponde a la que se relaciona en la Tabla 1. Este ajuste puede observarse en la Figura 10 y corresponde a la granulometría del agregado con la que se fabricó la mezcla bituminosa reciclada en frío que fue objeto de este estudio. Así mismo en la Fotografía 2 se observa la apariencia del RAP durante el ensayo de granulometría.

Figura 10: Curva granulométrica del RAP ajustada a la especificación IDU



Es importante resaltar que, aun cuando la especificación la GU-GE-011 del IDU recomienda utilizar subbase granular clase A (SBG_A), el ajuste de la granulometría del RAP se realizó con el mismo material reciclado, es decir, no se realizaron adiciones de otro material distinto al RAP. Lo anterior en consideración de que sería una variable que podría influir en el comportamiento mecánico de la mezcla.

- **Contenido de humedad del RAP (INV E-122)**

Para la elaboración de este ensayo se pesaron 3 muestras de 900 gr aproximadamente y se introdujeron en un horno de temperatura constante a 60°C. Posteriormente se pesó el material sacado del horno en varias ocasiones hasta que se obtuvo un valor constante, con lo que se determinó que la humedad del material era de 0.36%. En la Fotografía 3 se puede observar el registro del ensayo.

Fotografía 2: Ensayo de granulometría



- **Índice de alargamiento y aplanamiento (INV E-230)**

Para el ensayo se dispuso de 3000 gr aproximadamente de material RAP, los cuales se prepararon como se describe en el procedimiento de la norma y con lo cual se obtuvo un Índice de Alargamiento de 75% y un Índice de Aplanamiento de 29%. En la **Fotografía 4** se puede observar el registro del ensayo.

Fotografía 3 Determinación de la humedad natural de RAP



- **Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (INV E-227)**

Para el ensayo se dispuso también de 3000 gr aproximadamente de material RAP, los cuales fueron tamizados como se describe en el procedimiento de la norma y con lo cual

se obtuvo un porcentaje de caras fracturadas del 99% a una cara y de 98% a dos caras. En la Fotografía 5 se puede observar el registro del ensayo.

Fotografía 4 Ensayo de partículas alargadas y aplanadas de RAP



- **Resistencia al desgaste de los agregados (INV E-218)**

Para el ensayo se utilizaron 5000 gr aproximadamente de material RAP, los cuales se prepararon como se describe en el procedimiento de la norma y con lo cual se obtuvo un desgaste en la máquina de Los Ángeles de 51%. Debido a que la máquina de los Ángeles no estaba disponible para su uso en el desarrollo de esta investigación, el ensayo se realizó en el laboratorio de la Planta Concrecol.

Fotografía 5 Ensayo de caras fracturadas del RAP

- **Peso unitario de los agregados (INV E-217)**

Para el ensayo se dispuso también de 13000 gr aproximadamente de material RAP, los cuales fueron colocados en 5 capas apisonadas cada una con 25 golpes, suministrados con varilla compactadora, tal como lo establece la norma. El resultado del ensayo fue de 1.27 Ton/m^3 , En la Fotografía 6 se puede observar el registro del ensayo.

- **Peso específico de los agregados (INV E-222/223)**

Se realizó el ensayo de acuerdo a la especificación y el resultado obtenido fue de 2.15 En la Fotografía 7 se puede observar el registro del ensayo.

Fotografía 6 Ensayo de peso unitario del RAP



Fotografía 7 Ensayo de peso específico del RAP





La Tabla 7 resume los resultados de la caracterización granulométrica del RAP

Tabla 7: Características físicas del agregado RAP

Ensayo		Unidades	Norma	Resultado
Clasificación USCS		-	INV E-213	GW
Humedad		[%]	INV E-122	0.34
Índices	Alargamiento	[%]	INV E-230	75
	Aplanamiento	[%]		29
Porcentaje de caras fracturadas	1 cara	[%]	INV E-227	99
	2 caras	[%]		98
Desgaste en la máquina de Los Ángeles		[%]	INV E-218	51
Peso Unitario de los agregados		[Ton/m ³]	INV E-217	1.27
Peso específico de los agregados		[]	INV E-222/223	2.15

2.2.2 Caracterización de asfalto recuperado del RAP

Para realizar los ensayos característicos sobre el ligante asfáltico del RAP, fue necesario realizar la recuperación del asfalto mediante centrifugado del RAP y un solvente conocido como cloruro de metileno, siguiendo las pautas establecidas en la norma INV E-732. Posteriormente se sometió la mezcla obtenida en el centrifugado a destilación en el equipo de Rotavapor como lo indica la norma INV E-759.

▪ Contenido de asfalto – Extracción (INV E-732)

Este ensayo se realizó inicialmente de la forma convencional, utilizando gasolina y 3 muestras de RAP previamente pesadas, sometidas a centrifugado. Mediante este método se concluyó que el contenido promedio de asfalto en el RAP era de 4.6%. Con

este método no se puede recupera el asfalto del RAP, para posteriores ensayos en el cemento asfáltico. En la Fotografía 8 se puede observar el registro del ensayo.

Fotografía 8 Determinación del contenido de asfalto en el RAP usando gasolina



Con el objetivo de obtener muestras del asfalto envejecido para realizar los ensayos de caracterización del mismo, se pesaron 3 muestras de 1200 gramos aproximadamente, cada una. Posteriormente se sometieron las muestras a centrifugado con tricloretileno con el objetivo de quitar la totalidad del asfalto de las muestras. Luego de la ejecución del ensayo se calculó que el RAP tiene un contenido de asfalto del 5.5%. En la Fotografía 9 se puede observar el registro del ensayo.

Fotografía 9 Extracción de asfalto del RAP usando tricloretileno

Si se promedian los valores obtenidos en los dos ensayos de extracción utilizando distinto solvente se tiene que el contenido promedio de asfalto en el RAP es de 5.0%. Esto se realiza considerando que determinar el contenido de asfalto en un material heterogéneo que puede estar constituido por el fresado de distintas estructuras de pavimento asfáltico, puede llegar a ser desconcertante ya que se pueden obtener valores distintos entre un ensayo y otro. Para el caso particular de esta investigación se observa que los porcentajes de cemento asfáltico contenidos en el RAP no presentan una variación relativa muy alta.

- **Recuperación del asfalto de una solución utilizando el rotavapor (INV E-759)**

Se siguió el procedimiento establecido en la norma y se obtuvieron muestras de asfalto en una primera ronda de recuperación de asfalto. Posteriormente se realizaron nuevas recuperaciones con el fin de evitar que contenidos de solvente en el asfalto recuperado afecten las propiedades físicas y por ende los resultados de los ensayos de los mismos.

Por lo tanto en una segunda ronda de recuperación se decidió dejar la solución un poco más de tiempo con respecto a lo habitual en el rotavapor, con el objetivo de asegurar que el asfalto recuperado no contiene solventes. Esto no afecta las propiedades del asfalto envejecido, ya que el equipo utiliza CO_2 para crear una atmosfera durante el ensayo, libre de oxígeno que pueda oxidar el asfalto y envejecerlo más de lo que ya está. En la Fotografía 10 se puede observar el registro del ensayo.

Fotografía 10 Recuperación de asfalto mediante el uso del rotavapor



Desde el punto de vista de este ensayo se observó que el asfalto recuperado se encontraba muy envejecido, considerando que una vez que se separó el tricloretileno del asfalto, debió calentarse el matraz que contenía el asfalto en un horno a 160°C , con el objetivo de que el asfalto fluyera hasta el contenedor donde se iba a almacenar, como se muestra en la Fotografía 10

- **Peso específico del asfalto (INV E-711)**

Se determinó el peso específico del asfalto envejecido siguiendo lo establecido en la norma, obteniendo un valor de 1.36. En la Fotografía 11 se puede observar el registro del ensayo.

Fotografía 11 Peso específico del asfalto solido



- **Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola) INV E-712**

Se preparó la muestra obtenida de la primera ronda de recuperación de asfalto siguiendo los lineamientos de la norma. Una vez realizado el montaje del ensayo se comenzó el calentamiento del agua destilada con un tasa creciente de 5°C por minuto cada, hasta alcanzar una temperatura de 90°C para el asfalto del primer conjunto anillo-bola y 90.2°C en el asfalto del segundo conjunto, llegando así a una temperatura promedio de 90.1°C siendo este el resultado del ensayo.

Teniendo en cuenta el parámetro que establece la norma, en el que si se obtienen temperaturas de ablandamiento mayores a 80°C , entonces debe repetirse el ensayo usando glicerina en vez de agua, se realizó nuevamente el ensayo llegando a una temperatura de 95°C sin que el asfalto presentara ablandamiento. El ensayo se detuvo en esa temperatura por razones de seguridad. No obstante es importante considerar que este segundo ensayo se realizó con muestras obtenidas en la segunda recuperación de asfalto. En la Fotografía 12 se puede observar el registro del ensayo.

Fotografía 12 Punto de ablandamiento del asfalto



- **Penetración de los materiales asfálticos INV E-706**

Se preparó la muestra y el montaje del ensayo de acuerdo a la especificación, garantizando una temperatura constante durante la realización del ensayo de 25°C mediante la disposición de las muestras en un baño de maría. Se utilizó un penetrómetro digital con el que se obtuvieron las lecturas. Finalmente el valor encontrado para la penetración del material asfáltico es de 2.7 décimas de milímetro. En la Fotografía 13 se puede observar el registro del ensayo.

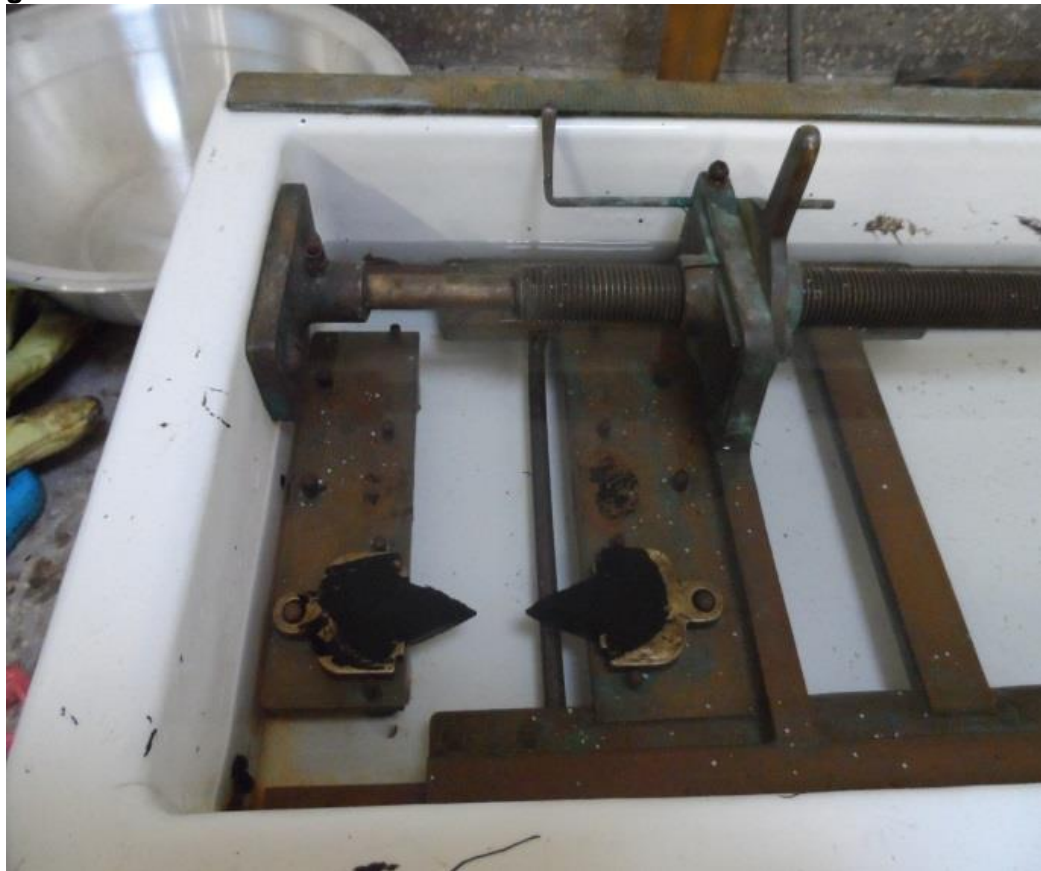
Fotografía 13 Penetración del asfalto



- **Ductilidad de los materiales asfálticos ASTM D-113 INV E-702**

Se preparó la muestra siguiendo los lineamientos de la norma. Una vez realizado el montaje del ensayo se garantizó que el agua del contenedor del ductilímetro tuviera una temperatura constante de 25°C al comienzo del ensayo y durante la ejecución del mismo. Seguidamente se puso en marcha el mecanismo del equipo, observando que se tuviera una velocidad de tracción de 5 cm por minuto, aproximadamente. El resultado del ensayo fue una ductilidad de 4 cm obtenida con muestras de la primera ronda de recuperación. Con muestras de la segunda ronda de recuperación se prepararon dos probetas que adquirieron una consistencia muy rígida después de calentar el asfalto para verterlo en los moldes y enrasar las probetas, lo cual no permitió la realización del ensayo con estas muestras. En la Fotografía 14 se puede observar el registro del ensayo.

Fotografía 14 Ductilidad del asfalto



▪ Viscosidad Brookfield INV E-717

Para la realización del ensayo se preparó la probeta con 10.5 gr, calentando el asfalto hasta el estado líquido y vertiéndolo en el contenedor apropiado para introducirlo en el horno del viscosímetro. Se acondiciono la muestra a una temperatura inicial de 120°C durante una hora, tiempo en el cual la aguja del viscosímetro no logro penetrar la muestra. Sucesivamente se fue incrementando la temperatura con el mismo tiempo de accionamiento de una hora por cada incremento, hasta llegar a los 150°C, temperatura en la cual se decidió detener el ensayo por seguridad y estabilidad del equipo. Dado lo anterior se deduce que el material asfáltico tiene una viscosidad muy alta y puede deducirse que la rigidez asociada a un avanzado grado de oxidación del asfalto no permitió la realización del ensayo. En la Fotografía 15 se puede observar el registro del ensayo.

Fotografía 15 Viscosidad del asfalto



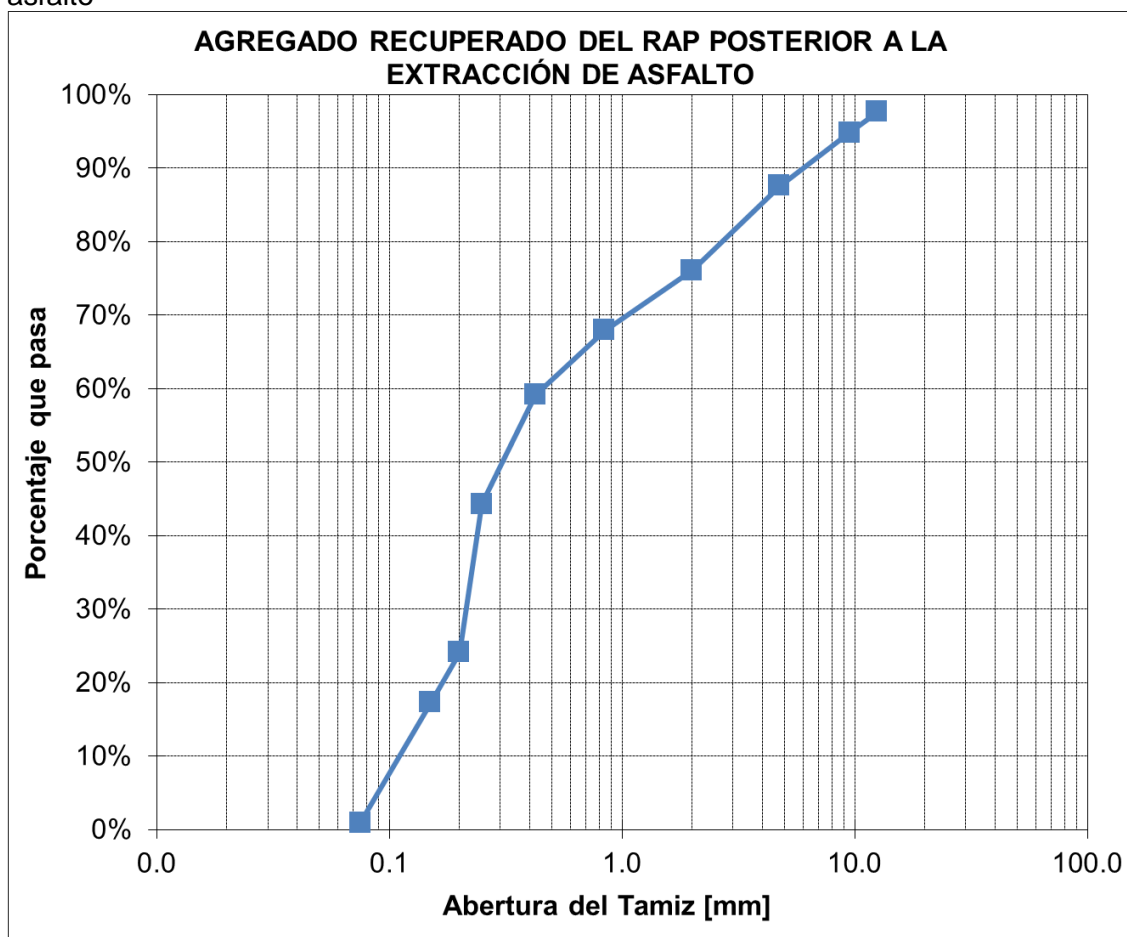
La Tabla 8 resume los resultados conseguidos en la caracterización del asfalto envejecido que se recuperó del RAP

Tabla 8: Características físicas del asfalto recuperado del RAP

Ensayo	Unidades	Norma	Resultado
Contenido de asfalto	[%]	INV E-732	5.0
Peso específico	[]	INV E-707	1.36
Punto de ablandamiento	[°C]	INV E-712	90.1
Penetración	[1/10 mm]	INV E-706	2.7
Ductilidad	[cm]	INV E-702	4.0
Viscosidad	[cP]	INV E-717	-

2.2.3 Caracterización de agregado recuperado del RAP

Finalmente se realizó lavado de la muestras sobre tamiz N°200 para llevar al horno nuevamente y luego realizar el ensayo de granulometría posterior a la extracción de asfalto, cuyo resultado se muestra en la Figura 11.

Figura 11: Curva granulométrica del agregado obtenido después de la extracción de asfalto

Tras realizar el ensayo de granulometría al agregado procedente de la recuperación de asfalto del RAP, se puede inferir que las partículas con tamaños iguales o superiores a

3/8" son agregados vírgenes que se encuentran ligados por el asfalto luego de la trituración con la fresadora. Lo cual permite suponer que el asfalto envejecido contenido en el RAP, continuará aportando cohesión entre las partículas de agregado, una vez se conforme una nueva mezcla a partir de este material.

2.3 Determinación de los contenidos óptimos teóricos de emulsión asfáltica, agua y cemento para la mezcla (MBRF+CH)

Como se estableció en la metodología de investigación, en esta sección se procederá a emplear los resultados de los ensayos de la caracterización del RAP y del asfalto envejecido, en la estimación de los contenidos óptimos teórico de agua y emulsión asfáltica que serán utilizados para la conformación de la mezcla bituminosa reciclada en frío con adición de cemento, que será objeto posteriormente de la caracterización mecánica.

De esta manera se aplicaran inicialmente las formulas empíricas que desarrollan los métodos referenciados en el Anexo A. El procedimiento de aplicación de las metodologías para la estimación del contenido óptimo de emulsión asfáltica se presenta en el Anexo B.

Los contenidos óptimos de emulsión obtenidos luego de evaluar las metodologías citadas anteriormente se resumen en la Tabla 9.

Tabla 9: Resumen de las estimaciones del cálculo teórico de emulsión asfáltica para la mezcla reciclada

Metodología		Contenido óptimo teórico de emulsión asfáltica [%]
Formula empírica de Duriez	K=3.5	8.7
	K=4.5	11.2
Formula empírica de Duriez considerando el contenido de asfalto residual del RAP	K=3.5	6.2
	K=4.5	8.7
Método de Illinois	Sin correcciones	9.8
	Instituto del asfalto	6.9
	Vergara (1994)	8.3
Método del ensayo de California 378	Sin correcciones	4.9
Método del instituto del asfalto	Sin correcciones	1.3
Método del Estado de Oregon (USA)	Sin correcciones	1.2

Luego de observar los resultados obtenidos en las metodologías evaluadas para estimar el porcentaje óptimo teórico de emulsión asfáltica, se puede inferir que utilizando los métodos que están en función de la superficie específica del agregado, como la fórmula empírica de Duriez con sus respectivas correcciones y el método de Illinois, se obtienen valores de porcentaje óptimo de emulsión entre 6.2% y 11.2%. Así mismo, al utilizar métodos que se desarrollaron para materiales asfálticos reciclados, como el del ensayo California 378, el del Instituto del Asfalto y el del estado de Oregon (USA), se calcularon valores de porcentaje óptimo de emulsión entre 1.2% y 4.9%, los cuales difieren en un 50% de los estimados con los métodos anteriormente mencionados, lo cual dificulta adoptar un valor específico para la fabricación de la mezcla.

Teniendo en cuenta lo evidenciado en los estudios afines a esta investigación que se resumen en la Tabla 2, la Tabla 3 y la Tabla 4, así como en los procedimientos establecidos para el cálculo del contenido óptimo de fluidos de compactación, se considera que el contenido óptimo de emulsión asfáltica a emplear en las mezclas recicladas frías posee una variabilidad que se encuentra principalmente, en función de las características granulométricas del RAP. Es por esta razón que se tomó la decisión de establecer, a partir de la documentación revisada, un porcentaje de emulsión fijo del 3.0% a utilizar en la fabricación de mezcla fría para posteriormente someterla a los ensayos de resistencia que se definirán en la etapa experimental. La anterior decisión se soporta apelando a las investigaciones afines a este estudio, como la de Díaz (2005) y Martínez-Echeverría, (2012), en donde se observa que las mezclas asfálticas fabricadas con el contenido de 3% de emulsión asfáltica presentaron comportamientos mecánicos aceptables.

Se considera necesario evaluar dos porcentajes de agua en la mezcla considerando que se va a adicionar cemento, el cual reacciona con el agua para generar rigidez en la mezcla. Por lo tanto se utilizarán contenidos de 1.5% y 3.0% de agua, en virtud de que no se realizarán los procedimientos prácticos que sirven para aproximarse a los contenidos óptimos de fluidos de compactación. Lo anterior permitirá realizar análisis de sensibilidad en la resistencia de la mezcla a partir de la variación en los contenidos de agua y emulsión, Así mismo se podrán comparar los resultados obtenidos en este estudio con valores encontrados en las investigaciones ya mencionadas.

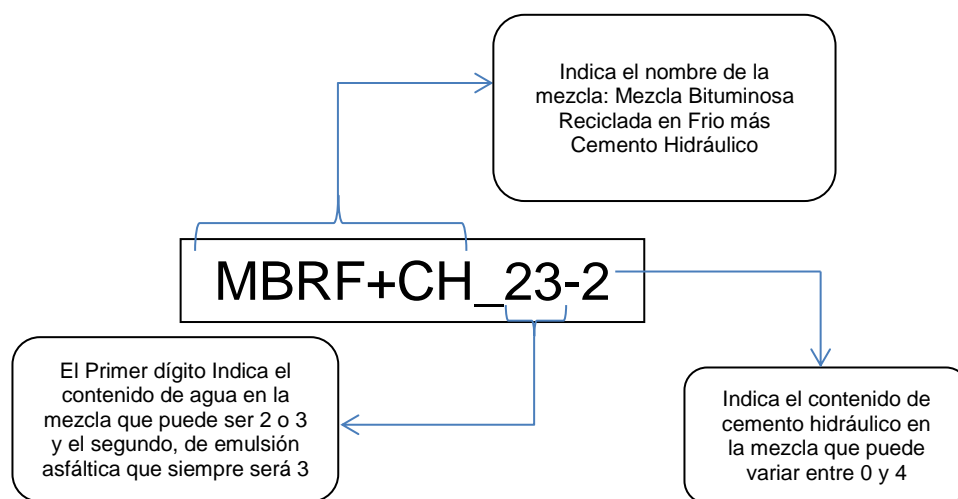
Considerando lo expuesto en la sección 1.2.4 y lo demás evidenciado en la revisión de antecedentes reportados en la bibliografía, se escogieron cuatro porcentajes de cemento (1%, 2%, 3% y 4%) y la variable inicial que sería la mezcla sin cemento (0%) para un total de cinco adiciones a evaluar.

2.4 Caracterización mecánica de la mezcla bituminosa reciclada en frio con cemento hidráulico (MBRF+CH)

Una vez determinadas las cantidades de agua, emulsión y los porcentajes de cemento a utilizar, a partir de los valores evaluados en esta investigación y encontrados en la bibliografía, se procedió a la fabricación de la mezcla que de ahora en adelante se denominará como se muestra en la Figura 12. La fabricación de las briquetas tendrá en cuenta las siguientes especificaciones:

- El agregado de la mezcla será únicamente el obtenido en el procedimiento de fresado, es decir, 100% RAP.
- Se empleará la emulsión asfáltica tipo CRL-1.
- El agua de la mezcla provendrá del sistema de acueducto.
- El ligante hidráulico a utilizar será el cemento portland tipo 1 sin modificaciones ni adiciones.

Figura 12: Nomenclatura para identificación de la mezcla



La Tabla 10 resume los contenidos de cada material, que para efectos de esta investigación serán tenidos en cuenta como los componentes utilizados en la conformación de la mezcla bituminosa reciclada en frío. Cabe notar que en la sección anterior se explicó que se emplearía un contenido de agua de 1.5%, sin embargo en la sección 2.4.1 se justifica el uso de 2.0% de agua.

Tabla 10: Contenidos de cada componente de la mezcla

Mezcla	RAP [%]	Emulsión asfáltica tipo CRL-1 [%]	Agua [%]	Cemento portland tipo 1 [%]
MBRF+CH_23	95.0	3.0	2.0	0.0
	94.0	3.0	2.0	1.0
	93.0	3.0	2.0	2.0
	92.0	3.0	2.0	3.0
	91.0	3.0	2.0	4.0
MBRF+CH_33	94.0	3.0	3.0	0.0
	93.0	3.0	3.0	1.0
	92.0	3.0	3.0	2.0
	91.0	3.0	3.0	3.0
	90.0	3.0	3.0	4.0

2.4.1 Fabricación de briquetas

Inicialmente al emplear el porcentaje de agua de 1.5%, se observó que la mezcla no tenía buena manejabilidad, por lo que se tomó la decisión de agregar 0.5% de agua más, para un total de 2%. Este porcentaje reemplazará el que se definió inicialmente de 1.5% y se utilizará de aquí en adelante.

Fotografía 16 Procedimiento de mezclado





El procedimiento de mezclado que inicialmente se separaron las fracciones de agregado por tamaño, de acuerdo a lo establecido en la granulometría ajustada del RAP a las especificaciones del IDU, para posteriormente combinarlos en los porcentajes requeridos de cada tamaño, luego se agregaba la adición de cemento que se iba a emplear. Después de esto se adicionaba la cantidad de agua requerida y finalmente se agregaba la emulsión asfáltica en un porcentaje siempre constante de 3%. En la Fotografía 16 se observa el procedimiento de mezclado del RAP con el agua, la emulsión asfáltica y el cemento.

Con el objetivo de elaborar una caracterización completa de la mezcla se realizó la ejecución de tres tipos de ensayo que miden la resistencia de la mezcla cuando se somete a cargas estáticas, como lo son el ensayo Marshall o de estabilidad y flujo, el ensayo de tracción indirecta y el ensayo de compresión inmersión. Aun cuando en las especificaciones establecidas para la ejecución de los ensayos anteriormente mencionados (INV E-748, INV E-725 y INV E-738), se estipula la fabricación de 3 briquetas para el ensayo Marshall, 6 briquetas para el ensayo de tracción indirecta y 10 briquetas para el ensayo de Inmersión – Compresión, en esta investigación se decidió adoptar un criterio investigativo que conllevó a la optimización de las cantidades ya descritas, por lo que se proyectó la elaboración de 2 briquetas por cada porcentaje de cemento y de agua en la mezcla, fabricando así un total de 110 briquetas distribuidas como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11: Briquetas elaboradas para los ensayos de carga estática

Mezcla	Contenido de cemento [%]	Ensayo Marshall (estabilidad y flujo)	Ensayo de Tracción Indirecta		Ensayo de Inmersión - Compresión	
Curado de las briquetas >>		Seco	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo
MBRF+CH_23	0	2	3	2	2	2
	1	2	3	2	2	2
	2	2	3	2	2	2
	3	2	3	2	2	2
	4	2	3	2	2	2
MBRF+CH_33	0	2	3	2	2	2
	1	2	3	2	2	2
	2	2	3	2	2	2
	3	2	3	2	2	2
	4	2	3	2	2	2
Subtotal briquetas por ensayo		20	30	20	20	20
Total briquetas		110				

Así mismo, se proyectó determinar el comportamiento dinámico de la mezcla, considerando que los pavimentos se encuentran sometidos constantemente a cargas cíclicas ejercidas por el tráfico vehicular. Es por esto que se planteó la realización de los ensayos de ahuellamiento y módulo dinámico de las mezclas asfálticas, para lo cual se dispuso de 5 briquetas para el ensayo de módulo dinámico y 6 briquetas tipo panela para el ensayo de ahuellamiento, tal como se muestra en la Tabla 12.

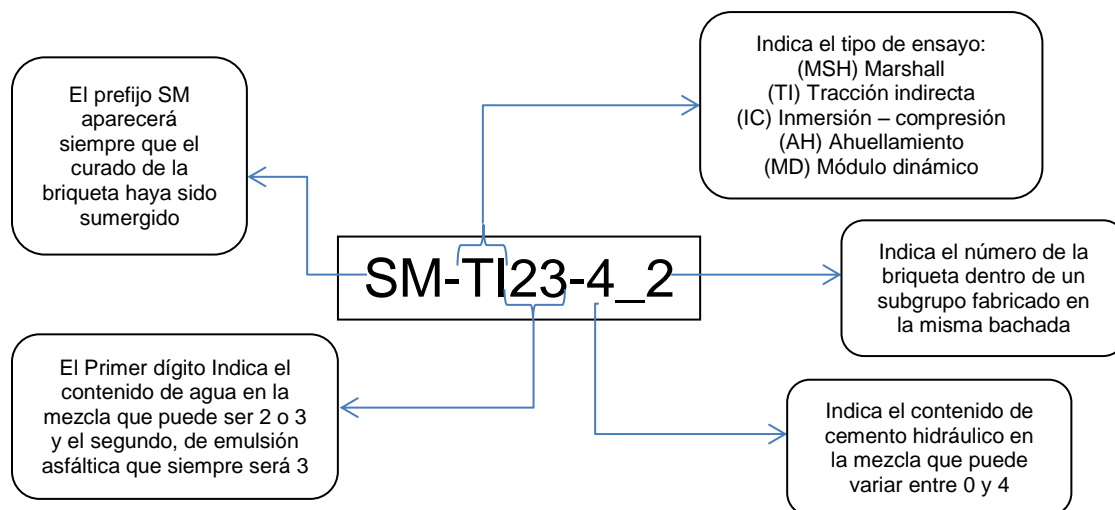
Para el ensayo de módulo dinámico se evaluó el comportamiento de la mezcla fabricada con un contenido de 3% de agua, en consideración a que esta mezcla registró los mayores órdenes de magnitud en resistencia desde el punto de vista de los ensayos de carga estática, tal como se podrá observar en el capítulo 3 de este estudio.

Tabla 12: Briquetas elaboradas para los ensayos de carga dinámica

Mezcla	Contenido de cemento [%]	Ensayo de Ahuellamiento	Ensayo de Módulo Dinámico
Curado de las briquetas >>		Seco	Seco
MBRF+CH_23	0	1	-
	2	1	-
	4	1	-
MBRF+CH_33	0	1	1
	1	-	1
	2	1	1
	3	-	1
	4	1	1
Subtotal briquetas por ensayo		6	5
Total briquetas		11	

En total se fabricaron 121 briquetas para caracterizar mecánicamente la mezcla bituminosa reciclada en frío con adición de cemento. Cada biqueta se identificó con una nomenclatura cuya interpretación se explica a partir de un ejemplo en la Figura 13.

Figura 13: Nomenclatura para identificación de briquetas



2.4.2 Ensayo Marshall (Estabilidad y flujo) (INV E-748)

Para la evaluación del comportamiento mecánico de la mezcla mediante el ensayo Marshall se procedió a fabricar 20 briquetas, que se compactaron con 75 golpes por cara, considerando los procedimientos establecidos en la norma INV E-748, así mismo se consultaron las especificaciones para el cálculo de la gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados, superficialmente secos (SSS), (INV. E-733 - método A, numeral 8.2). También para el análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente (INV. E-799).

Con lo anterior se estudiaron las variaciones en el comportamiento mecánico de las briquetas fabricadas con adiciones de cemento. Los especímenes utilizados en el ensayo se muestran en la Tabla 13 y en la Fotografía 17 se puede observar el registro del ensayo Marshall.

Tabla 13: Briquetas utilizadas en el ensayo Marshall

Mezcla	Contenido de cemento [%]	Briqueta	
MBRF+CH_23	0	MSH23-0_1	MSH23-0_2
	1	MSH23-1_1	MSH23-1_2
	2	MSH23-2_1	MSH23-2_2
	3	MSH23-3_1	MSH23-3_2
	4	MSH23-4_1	MSH23-4_2
MBRF+CH_33	0	MSH33-0_1	MSH33-0_2
	1	MSH33-1_1	MSH33-1_2
	2	MSH33-2_1	MSH33-2_2
	3	MSH33-3_1	MSH33-3_2
	4	MSH33-4_1	MSH33-4_2

Fotografía 17 Ensayo Marshall

2.4.3 Ensayo de Tracción Indirecta (INV E-725)

Para la evaluación del comportamiento mecánico de la mezcla mediante el ensayo de Tracción Indirecta se fabricaron 40 briquetas, de las cuales 20 se sometieron a un curado sumergido con el objetivo de medir la resistencia conservada. Se compactaron con 100 golpes por cara considerando la siguiente metodología:

- Se procedió a la determinación del número de golpes óptimo para la compactación de las probetas, para lo cual se hicieron 3 probetas con diferentes

energías de compactación, 50, 85 y 110 golpes así como una reducción de la mezcla. Seguidamente se preparó un diagrama en el cual se comparaban el número de golpes contra el contenido de vacíos. De acuerdo con lo anterior, se determinó que la energía de compactación de 100 golpes permitía fabricar una mezcla en el rango de 6-8 % de contenido de vacíos, tal como lo sugiere la norma INV E-725.

- Se permitió el curado durante 7 días antes de hallar las densidades y calcular los contenidos de vacíos. Seguidamente se escogió la mitad de las briquetas para sumergir en el agua verificando que el promedio de las densidades de las sumergidas con las no sumergidas fuera parecido.

Tabla 14: Briquetas utilizadas en el ensayo de tracción indirecta

Nombre de la mezcla	Contenido de cemento [%]	Briqueta			
		Curado al aire		Curado sumergido	
MBRF+CH_23	0	TI23-0_1	TI23-0_4	SM-TI23-0_2	SM-TI23-0_3
	1	TI23-1_1	TI23-1_2	SM-TI23-1_3	SM-TI23-1_4
	2	TI23-2_3	TI23-2_4	SM-TI23-2_1	SM-TI23-2_2
	3	TI23-3_2	TI23-3_4	SM-TI23-3_1	SM-TI23-3_3
	4	TI23-4_1	TI23-4_4	SM-TI23-4_2	SM-TI23-4_3
MBRF+CH_33	0	TI33-0_1	TI33-0_3	SM-TI33-0_2	SM-TI33-0_4
	1	TI33-1_2	TI33-1_3	SM-TI33-1_1	SM-TI33-1_4
	2	TI33-2_3	TI33-2_4	SM-TI33-2_1	SM-TI33-2_2
	3	TI33-3_3	TI33-3_4	SM-TI33-3_1	SM-TI33-3_2
	4	TI33-4_2	TI33-4_4	SM-TI33-4_1	SM-TI33-4_3

- Se calculó el volumen de vacíos con aire y se adicionó vacío para alcanzar a saturar la briqueta entre 55 y 80% de saturación, se pesó en el agua e inmediatamente se sumergió al agua durante 7 días.
- Posteriormente, se tomó cada una de las briquetas y se pesaron en el agua como en el aire saturado, superficialmente seco (SSS), se procede a fallar y se toma el dato de resistencia. La dosificación de la mezcla se muestra en la Tabla 14.

En la Fotografía 18 se puede observar el registro del ensayo Tracción indirecta

Fotografía 18 Ensayo de tracción indirecta

2.4.4 Influencia del tiempo de curado en la resistencia de la mezcla bituminosa reciclada en frío con cemento

Considerando que en esta investigación se incorporaron adiciones de cemento hidráulico, con el objetivo de estudiar el efecto de las mismas en la resistencia de las mezclas bituminosas recicladas en frío, se vio la importancia de observar el comportamiento de la mezcla cuando se evalúa la resistencia con unos tiempos mayores de fraguado a los establecidos en las especificaciones.

En función de lo anterior se fabricaron 10 probetas utilizando la misma metodología descrita en el numeral 2.4.2. El curado de estas briquetas se realizó al aire, ya que no se busca medir la resistencia conservada, sino la variación de resistencia de briquetas ensayadas a los 7 y 30 días de curado, conformadas con la energía de compactación empleada en el ensayo Marshall.

Las briquetas dispuestas para la medición de la resistencia mediante el ensayo de Tracción Indirecta luego de 30 días de curado, se muestran en la Tabla 15 y serán comparados con los resultados de los ensayos realizados a los 7 días de curado.

Tabla 15: Briquetas utilizadas para evaluar la variación de la resistencia por curado

Nombre de la mezcla	Contenido de cemento [%]	Briquetas curadas al aire
MBRF+CH_23	0	TI23-0_5
	1	TI23-1_5
	2	TI23-2_5
	3	TI23-3_5
	4	TI23-4_5
MBRF+CH_33	0	TI33-0_5
	1	TI33-1_5
	2	TI33-2_5
	3	TI33-3_5
	4	TI33-4_5

2.4.5 Ensayo de Inmersión-compresión (INV E-738)

Para la evaluación del comportamiento mecánico de la mezcla mediante el ensayo de Inmersión-Compresión se fabricó también 40 briquetas, de las cuales 20 se sometieron a un curado sumergido con el objetivo de medir la resistencia conservada. La fabricación de las briquetas se realizó mediante el siguiente procedimiento:

- Se pesaron 1750 gr aproximadamente para cada briketa, luego se adicionó agua para ajustar la muestra a la humedad deseada, posteriormente se incorporó emulsión al 3% del agregado y se mezcló para luego disponer la mezcla sobre el molde.
- Luego se procedió a dar carga de 2 a 3 minutos hasta llegar a 170 kN donde se mantuvo durante 2 minutos. Se dejaron curar en el molde 24 horas, se desmoldaron y luego se hallaron las gravedades específicas bulk y se escogieron las probetas para sumergir verificando que los dos grupos quedaran equilibrados en cuanto a gravedad específica, para permitir un curado al aire durante 7 días.
- El curado sumergido también se extendió por 7 días, para luego fallar las briquetas en el equipo de Inmersión-Compresión. Las briquetas utilizadas en el

ensayo se muestran en la Tabla 16. En la Fotografía 19 se puede observar el registro del ensayo de Inmersión – compresión.

Tabla 16: Briquetas utilizadas en el ensayo de Inmersión-Compresión

Mezcla	Contenido de cemento [%]	Briqueta			
		Curado al aire		Curado sumergido	
MBRF+CH_23	0	IC23-0_3	IC23-0_4	SM-IC23-0_1	SM-IC23-0_2
	1	IC23-1_1	IC23-1_4	SM-IC23-1_2	SM-IC23-1_3
	2	IC23-2_1	IC23-2_4	SM-IC23-2_2	SM-IC23-2_3
	3	IC23-3_1	IC23-3_3	SM-IC23-3_2	SM-IC23-3_4
	4	IC23-4_1	IC23-4_2	SM-IC23-4_3	SM-IC23-4_4
MBRF+CH_33	0	IC33-0_2	IC33-0_3	SM-IC33-0_1	SM-IC33-0_4
	1	IC33-1_1	IC33-1_3	SM-IC33-1_2	SM-IC33-1_4
	2	IC33-2_1	IC33-2_2	SM-IC33-2_3	SM-IC33-2_4
	3	IC33-3_1	IC33-3_3	SM-IC33-3_2	SM-IC33-3_4
	4	IC33-4_1	IC33-4_4	SM-IC33-4_2	SM-IC33-4_3

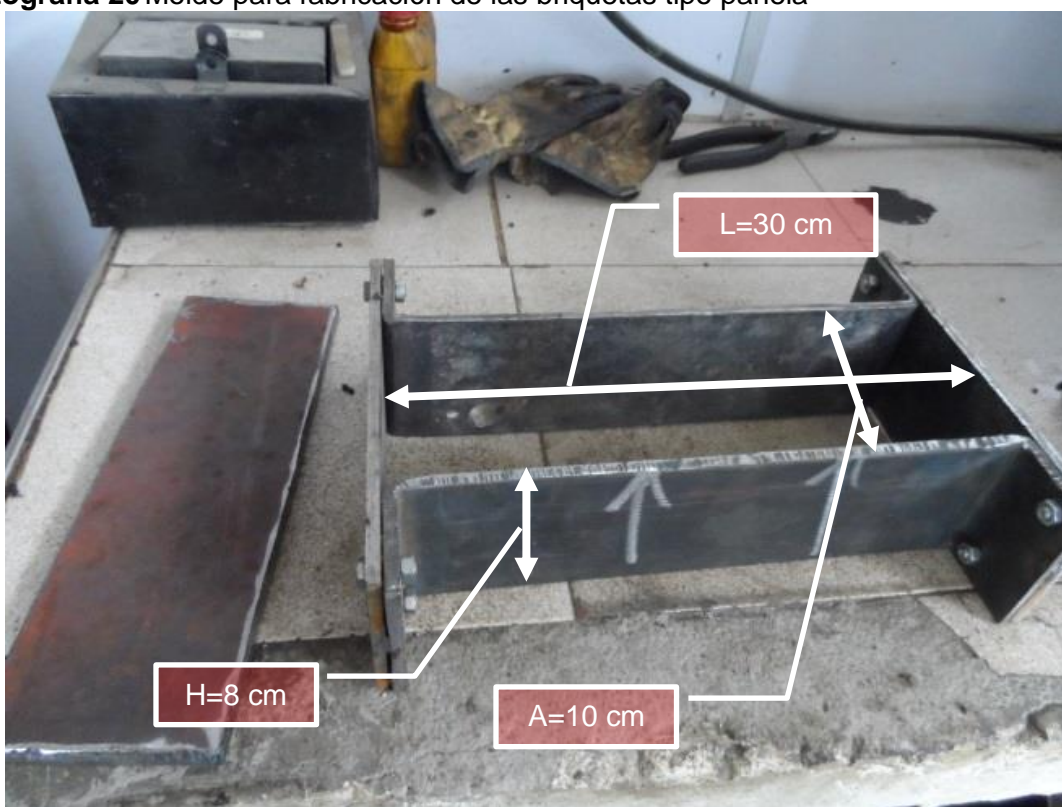
Fotografía 19 Ensayo de Inmersión – compresión



2.4.6 Ensayo de Ahuellamiento (INV E-779)

Con el objetivo de evaluar las modificaciones en la resistencia de la mezcla a la deformación plástica, que se puedan presentar a partir de la adición de cemento, se fabricaron 6 briquetas tipo panela para someterlas al ensayo de ahuellamiento mediante el empleo de la máquina de la rueda cargada (INV E-779), para tal propósito se fabricó el molde que se muestra en la Fotografía 20. Las dimensiones de la briketa rectangular serán de 30 cm de largo (L) x 10 cm de ancho (A) x 8 cm de altura (H). La temperatura promedio de ensayo fue la del ambiente a 20°C.

Fotografía 20 Molde para fabricación de las briquetas tipo panela



▪ Fabricación de las briquetas para el ensayo de Ahuellamiento

Para la ejecución de este ensayo se fabricaron las briquetas utilizando la equivalencia de energías de compactación E_c , como se muestra en la Ecuación 6:

$$E_c = \frac{n * N * W * h}{V}$$

Ecuación 6

Dónde:

n=Número de golpes

N=Número de capas

W=Peso del pistón del martillo

h=Altura de Caída

V=Volumen compactado

De esta ecuación tenemos como constantes el peso del pistón del martillo, la altura de caída del martillo y el volumen del molde. La energía de compactación que se proporcionó al material para la conformación de la briqueta, se calculó considerando la energía de compactación del ensayo Marshall de 75 golpes por cara, es decir, 150 golpes por capa. En la Tabla 17 se relacionan las energías de compactación calculadas para el molde rectangular.

Tabla 17: Equivalencia de energía para la compactación de la briqueta tipo panela

Equivalencia de energías	n	N	W [kN]	h [m]	V [m³]	EC [kJ/m³]	T [°C]
Briqueta Marshall (H=76.2mm D= 101.6mm)	150	1	0.04	0.4572	0.0006	4.93	20
Panela ahuellamiento (L=300 mm, A=100 mm H=80 mm)	290	2	0.04	0.4572	0.0024	4.91	20

De acuerdo con esto el procedimiento de compactación se reduce a impartir 290 golpes en una primera capa de 4 cm de altura y otros 290 golpes en la segunda capa para completar los 8 cm de altura que tiene la panela, con el pisón del martillo Marshall. Esto nos permite dividir los 290 golpes en tres rondas de 97 golpes aproximadamente que se pueden distribuir como: una en el centro de la platina y las otras dos en los costados, aprovechando que la dimensión de longitud de la panela es de 30 cm y el pisón tiene un diámetro aproximado de 10 cm, lo cual facilita el procedimiento.

Para el curado de las panelas se recurrió a la metodología empleada en los ensayos de resistencia descritos anteriormente. Una vez finalizado el proceso de compactación, se dejó la panela durante un día en el molde para posteriormente retirarlo y así permitir un

curado al aire durante 7 días, previo al ensayo. En la Tabla 18 se relacionan las briquetas tipo panela fabricadas.

Tabla 18: Briquetas utilizadas para el ensayo de Ahuellamiento

Nombre de la mezcla	Contenido de cemento [%]	Briqueta
MBRF+CH_23	0	AH23-0
	2	AH23-2
	4	AH23-4
MBRF+CH_33	0	AH33-0
	2	AH33-2
	4	AH33-4

▪ Equipo y preparación del ensayo

Para la ejecución de este ensayo se utilizó el equipo ahuellador que de la Universidad Nacional de Colombia, el cual cumple con las dimensiones normalizadas que se encuentran en la norma INV-E 779. Se utilizaron pesas de acero que juntas sumaban 125 Lb (56.7 kg) y la temperatura del ensayo fue de 18 °C (temperatura ambiente). La Fotografía 21 muestra el ensayo de ahuellamiento aplicado a la biqueta de la mezcla MBRF_33 con 4% de contenido de cemento.

De acuerdo con la norma INV-E 779 las partes del equipo ahuellador (máquina de la rueda cargada), se distribuyen de la siguiente manera:

1. Base y canal ajustables de acero
2. Motor, con accesorios de acoplamiento, de 1/3 HP y 750 RPM
3. Engranaje reductor horizontal, de doble salida y de relación 40:1, y 43,75 RPM.
4. Biela motriz de 15.216 cm. de radio
5. Brazos conectores de conducción, de canal de acero, ajustables.
6. Caja para pesas, ajustable para centrarla sobre el eje de la rueda.
7. Ensamblaje con rueda neumática de 7.608 cm. de diámetro por 2.536 cm de ancho, de caucho blando (dureza 60-70), montada a una distancia de 60.864 cm de los ejes motrices que la Impulsen.
8. Contador de revoluciones, regraduable a 00.
9. Pesas de acero que sumen un total de 125 Lb (56.7 kg).

10. Placas de acero galvanizado calibre 20 para el montaje de las muestras, de dimensiones 7.608 cm de ancho por 40.576 cm de largo, sin rebabas.

Fotografía 21 Máquina de la rueda cargada



2.4.7 Ensayo de Módulo Dinámico (INV E-754)

Con el propósito de observar las modificaciones en las propiedades elásticas de la mezcla, que se puedan presentar al adicionar cemento portland, se fabricaron 5 briquetas con las dimensiones especificadas en la norma INV E-753, es decir, con una relación 2H:1D, pero con un procedimiento de compactación similar al que se empleó para fabricar las panelas del ensayo de ahuellamiento. Para tal propósito se fabricó el molde que se muestra en la Fotografía 22, a partir de moldes de briqueta Marshall.

La energía de compactación que se proporcionó al material para la conformación de la briqueta, se calculó considerando la energía de compactación del ensayo Marshall de 75 golpes por cara, es decir, 150 golpes por capa. En la Tabla 19 se relacionan las energías

de compactación calculadas para el molde tipo cilindro. Las dimensiones de la briqueta serán de 20 cm de altura x 10 cm de diámetro, aproximadamente.

Fotografía 22 Molde para fabricación de las briquetas de módulo dinámico

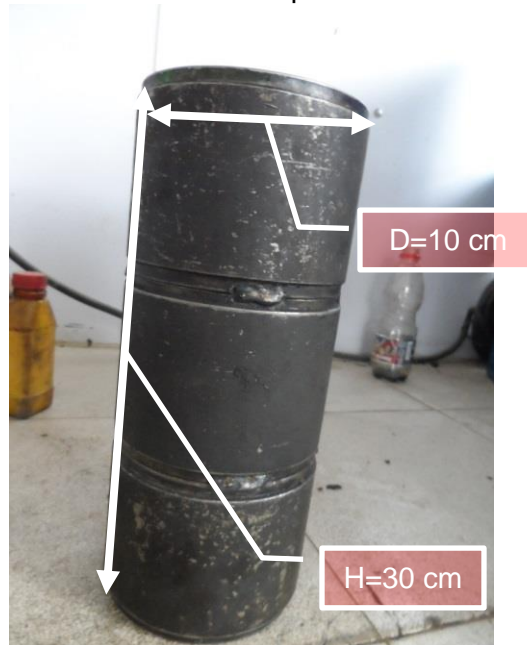


Tabla 19: Equivalencia de energía para la compactación de la briqueta de módulo dinámico

Equivalencia de energías	n	N	W [kJ]	h [m]	V [m ³]	EC [kJ/m ³]	T [°C]
Briqueta Marshall (H=76.2mm D=101.6mm)	150	1	0.04	0.4572	0.0006	4.93	20
Briqueta para módulo dinámico (D=101.6 mm, H=200 mm)	98	4	0.04	0.4572	0.0016	4.91	20

De acuerdo con esto el procedimiento de compactación se reduce a proporcionar 98 golpes distribuidos uniformemente en 4 capas de 5 cm de altura, aproximadamente. Luego de esto se dejó la briqueta durante un día en el molde para posteriormente retirar el molde y así permitir un curado al aire durante 7 días previo al ensayo.

Los parámetros bajo los cuales se realizó este ensayo comprenden temperaturas de 9°C, 20°C y 30°C que corresponden a la temperatura mínima diaria promedio, máxima diaria promedio y máxima registrada anual, respectivamente en la ciudad de Bogotá D.C. Así mismo se eligieron las frecuencias de 1, 4, 10 y 16 Hz que corresponden a velocidades de diseño de 6, 24 – 30, 60 y 80 Km/h respectivamente. En la Tabla 20 se relacionan las briquetas fabricadas para el ensayo de módulo dinámico.

Tabla 20: Briquetas utilizadas en el ensayo de Módulo dinámico

Nombre de la mezcla	Contenido de cemento[%]	Briqueta
MBRF+CH_33	0	MD33-0
	1	MD33-1
	2	MD33-2
	3	MD33-3
	4	MD33-4

La Fotografía 23 muestra las briquetas compactadas para el ensayo de Módulo Dinámico

Fotografía 23 Briquetas para el ensayo de módulo dinámico

El registro fotográfico de la campaña experimental se presenta ampliado en el Anexo E.

3.Resultados y análisis

En este capítulo se presenta la evaluación del desempeño de las mezclas fabricadas en frío para diferentes contenidos de cemento.

Inicialmente se evaluarán los resultados obtenidos en la campaña experimental y así se compararán los resultados con los parámetros de aceptación establecidos en la normativa para este tipo de mezclas, así mismo, se emplearán los resultados obtenidos en otras investigaciones con el objetivo de comparar la pertinencia de los resultados obtenidos en esta investigación.

3.1 Análisis de las propiedades granulares del RAP

Los resultados obtenidos para las características mecánicas de los materiales granulares del RAP, se compararon con la especificación técnica del IDU 550-11, la cual establece los requisitos mínimos que debe cumplir el agregado grueso para mezclas asfálticas en frío, y con la especificación de construcción INVÍAS 441-13 y 461-13, que también establecen los requisitos para los agregados pétreos empleados en la fabricación de mezclas densas en frío y reciclado del pavimento asfáltico en frío.

Se tuvieron en cuenta las especificaciones mencionadas anteriormente, considerando que son las que mejor se relacionan con el tipo de mezcla que se está estudiando en la presente investigación: Mezcla bituminosa reciclada en frío con adiciones de cemento hidráulico (MBRF+CH).

La Tabla 21 presenta los valores obtenidos para cada ensayo de caracterización granulométrica realizados en esta investigación y su respectivo valor de referencia. Los resultados de los análisis se muestran en los apartes inmediatamente posteriores a la Tabla 21.

Tabla 21: Análisis de las propiedades granulares del RAP

Ensayo	Unidades	Norma	Valor	Referente	
				Fuente	Valor
Clasificación USCS	-	INV E-213	GW	-	-
Humedad	[%]	INV E-122	0.34	-	-
Índices	Alargamiento	INV E-230	75	IDU 550-11 (Máx)	20
	Aplanamiento		29		25
Porcentaje de caras fracturadas	1cara	INV E-227	99	IDU 550-11 (Mín)	90
	2caras		98		75
Desgaste en la máquina de Los Ángeles	[%]	INV E-218	51	IDU 550-11 (Máx)	35
Peso Unitario de los agregados	[Ton/m ³]	INV E-217	1.27	Valores típicos	1.5-1.9
Peso específico de los agregados	[]	INV E-222/223	2.15	Valores típicos	2.4-2.7

Las memorias de los ensayos de laboratorio realizados se podrán consultar con mayor detalle en el Anexo D.

▪ Caracterización granulométrica del RAP (INV E-213)

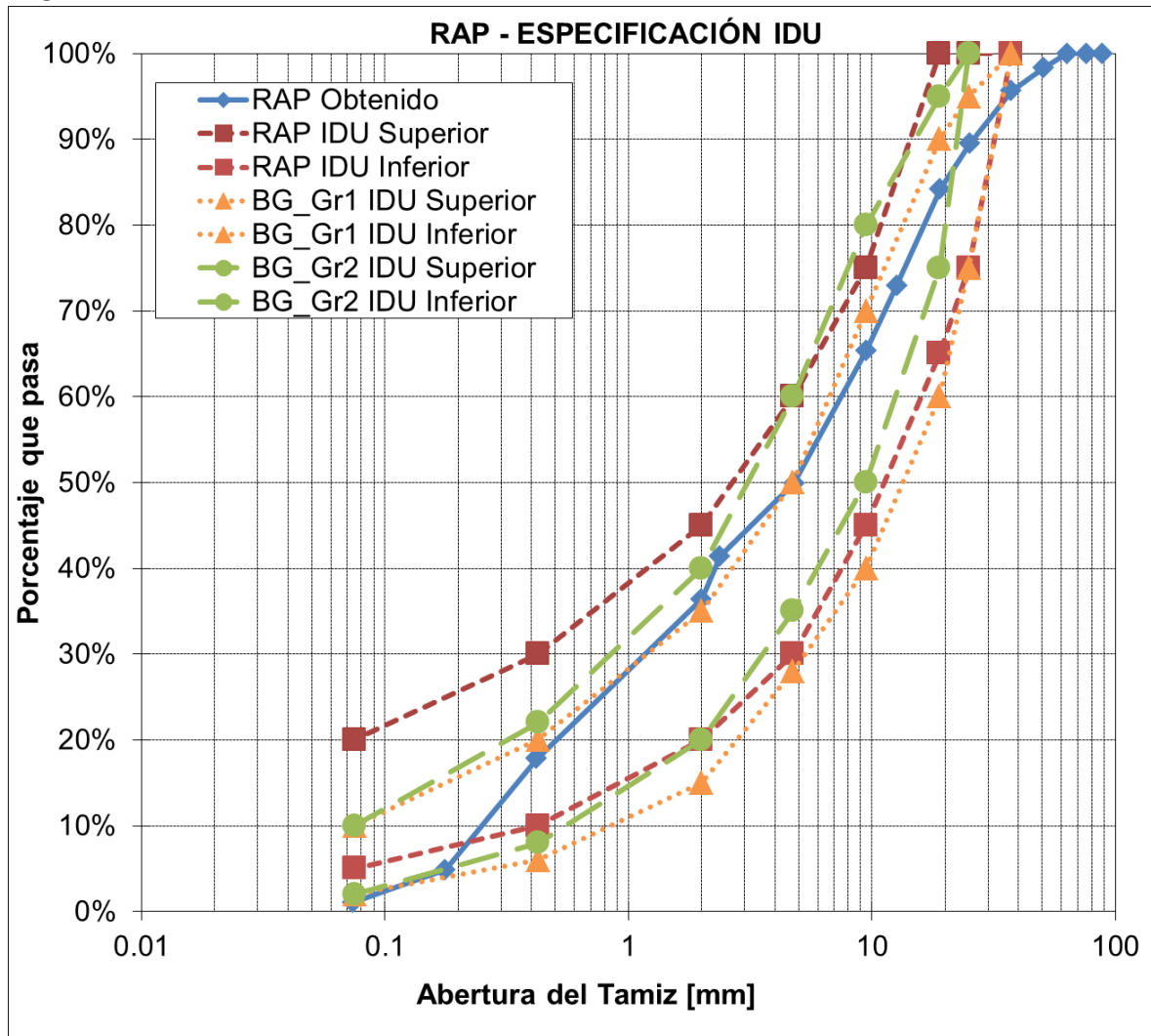
Al establecer una especificación de franja granulométrica para los materiales a utilizar, se busca obtener una menor cantidad de vacíos en la mezcla, utilizando una mayor variedad de tamaños de agregados, con lo que a su vez se quiere conseguir una mayor compacidad, mayor resistencia a la compresión, menor permeabilidad, mayor durabilidad, mayor densidad, mayor resistencia al desgaste y una mayor economía.

Dado lo anterior y teniendo en cuenta los resultados obtenidos en este ensayo para el RAP, se considera que este material se ajusta bien a los parámetros establecidos en la norma para los agregados reciclados, aun cuando se realizó un ajuste a la granulometría original del RAP para cumplir a cabalidad con las curvas granulométricas, lo que posteriormente se reflejará en un buen comportamiento mecánico.

Así mismo se comparó la curva granulométrica del RAP con las establecidas en la especificación IDU-ET-2011 para base granular, considerando que la mezcla estudia en esta investigación podría usarse, además de capa de rodadura, como reemplazo de una base granular para estructura de pavimento convencional.

De acuerdo con lo observado en la Figura 15 se puede afirmar que el RAP presentaría un buen comportamiento dentro de la estructura de pavimento que se conforme con este material, aun cuando no se ajusta perfectamente a lo establecido para base granular y material para reciclaje de pavimento asfáltico, puede observarse que se tiene un material bien gradado.

Figura 14: Comparación de la granulometría del RAP respecto a las especificaciones IDU



▪ **Contenido de humedad del RAP (INV E-122)**

El contenido de humedad para el material resulta ser bastante bajo (0.36%), y esto se debe en gran medida a que la mayoría de las caras de las partículas están recubiertas

por asfalto, el cual actúa como un impermeabilizante que reduce significativamente la absorción de agua por parte de las partículas de agregado. Además el efecto impermeable logrado por el asfalto permite al agua fluir con rapidez por las paredes de las partículas, por lo que al no haber retención del líquido el proceso de evaporación aumenta, al igual que la relación de vacíos del material.

- **Índice de alargamiento y aplanamiento (INV E-230)**

En la especificación técnica IDU 550-11 se establece para mezclas asfálticas en frío, valores máximos de los índices de aplanamiento y alargamiento del 25% y 20% (dependiendo de la categoría del tránsito); por otro lado en la especificación de construcción INVÍAS 441-13 y 461-13 se define una relación entre partículas planas y alargadas de 5:1, para mezclas asfálticas en frío y materiales reciclados.

De acuerdo con lo anterior se observa que las partículas del material de RAP no cumplen con los índices máximos de aplanamiento y alargamiento (29% y 75%), pero si cumplen con el criterio de la relación máxima entre estos dos índices 2:5.

La cantidad de partículas alargadas es mayor en comparación a las partículas planas, por lo tanto se considera que el agregado se encuentra en condiciones poco optimas, ya que este importante porcentaje de partículas alargadas podría afectar notablemente los procedimientos constructivos en la compactación, manejabilidad, resistencia, fricción y durabilidad del agregado; de igual manera las propiedades y el comportamiento de la mezcla podrían resultar afectados.

- **Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (INV E-227)**

En la especificación técnica IDU 550-11 se establecen para mezclas asfálticas en frío, valores mínimos de partículas fracturadas por una cara del 75% y 90%, y por dos caras del 50%, 60% y 75% (dependiendo de la categoría del tránsito); por otro lado en la especificación de construcción INVÍAS 441-13 y 461-13 los valores mínimos son 50%, 60%, 75% y 85% para una cara fracturada y, 60% y 70% para dos caras, considerando mezclas asfálticas en frío y materiales reciclados.

De acuerdo con lo anterior se observa que las partículas del RAP cumplen ampliamente con los porcentajes de caras fracturadas, ya que se obtuvieron valores del 99% y 98% a una cara y dos caras respectivamente.

Un mayor porcentaje de caras fracturadas (cerca al 100%) maximiza la resistencia al esfuerzo cortante como resultado del incremento en la fricción entre las partículas, además de brindar una mayor estabilidad a los agregados empleados en la mezcla asfáltica. Las partículas irregulares y angulares generalmente ofrecen mayor resistencia al desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que se entrelazan al ser compactadas; un mejor entrelazamiento se logra generalmente con partículas de bordes puntiagudos y de forma cúbica, las cuales se obtienen como producto casi siempre de trituración.

- **Resistencia al desgaste de los agregados (INV E-218)**

En la especificación técnica IDU 550-11 se establecen para mezclas asfálticas en frío, valores máximos de la resistencia al desgaste del 35%, 30% y 25% (dependiendo de la categoría del tránsito); por otro lado en la especificación de construcción INVÍAS 440-13 los valores máximos son 35% y 25% considerando mezclas asfálticas en frío y materiales reciclados.

De acuerdo con lo anterior se observa que las partículas del material no cumplen con los requerimientos mínimos de resistencia al desgaste (51%), por lo cual deberá evaluarse la conveniencia de utilizar estos materiales en capas de rodadura.

El material presenta una resistencia moderada al desgaste, desintegración, degradación y rotura producida por su almacenamiento, colocación y proceso de compactación. La resistencia al desgaste cobra importancia cuando las partículas van a estar sometidas a un roce continuo como es el caso de pavimentos, para lo cual los agregados que se utilizan deben ser duros y resistentes, de esta forma se garantiza la estabilidad y funcionalidad del pavimento, sobre todo durante su vida de servicio proyectada.

Lo anterior se constató luego de la realización de los ensayos de Ahuellamiento en la mezcla (MBRF+CH), (de los cuales se hablará en un aparte más adelante en el

documento) al observar el estado de las briquetas después del ensayo, en el cual es notable la desintegración de las mismas.

- **Peso unitario de los agregados (INV E-217)**

En lo que respecta a las especificaciones técnicas de construcción, no existen requerimientos mínimos en cuanto a peso unitario se refiere. En lo que concierne a materiales sueltos el peso unitario generalmente varía entre 1.4 y 1.6 Ton/m³, mientras que para materiales compactos este valor aumenta entre 1.5 y 1.9 Ton/m³.

De acuerdo con lo anterior se tiene que el material RAP presenta un bajo peso unitario (1.27 Ton/m³) con respecto a los valores típicos de otros materiales compactos, no obstante el valor bajo de peso unitario puede relacionarse con una mayor relación de vacíos por la presencia del bitumen, pero no se asocia a una determinada calidad de los materiales evaluados por lo cual no es un criterio de aceptación en la especificación.

- **Peso (Gravedad) específico de los agregados (INV E-222/223)**

En lo que respecta a las especificaciones técnicas de construcción, no existen requerimientos mínimos en cuanto al peso específico se refiere. En lo que concierne a materiales típicos el peso específico generalmente varía entre 2.4 y 2.7.

El material presenta un peso específico (2.15) con respecto a los valores típicos de otros materiales comunes, lo cual puede estar asociado al bajo peso específico del cemento asfáltico; al igual que con el resultado obtenido para el peso unitario, este valor bajo de peso específico no se asocia a una determinada calidad de los materiales evaluados por lo cual no es un criterio de aceptación en la especificación.

3.2 Análisis de las propiedades del asfalto envejecido

Los resultados obtenidos para las características físicas del asfalto extraído del RAP, se contrastaron con valores de referencia extraídos de las especificaciones técnicas y de construcción IDU 200-11 e INVÍAS 410-13, las cuales establecen requisitos para el cemento asfáltico. Se escogieron estas especificaciones teniendo en cuenta que el

asfalto presente en el material de RAP, es de tipo convencional sin ninguna modificación por adición de polímeros. Así mismo se hace mención de otras investigaciones en la que realizan estudios similares sobre asfalto envejecido.

La Tabla 22 presenta los valores obtenidos para cada ensayo de caracterización del asfalto envejecido realizados en esta investigación y su respectivo valor de referencia. Los resultados de los análisis se muestran en los apartes inmediatamente posteriores a la Tabla 22.

Tabla 22: Análisis de las propiedades del asfalto envejecido

Ensayo	Unidades	Norma	valor	Referente	
				Fuente	Valor
Contenido de asfalto	[%]	INV E-732	5.0	Valores típicos	4.8 – 5.4
Peso específico	[]	INV E-707	1.36	Valores típicos	1.3 – 1.4
Punto de ablandamiento	[°C]	INV E-712	90.1	IDU 200-11 (Máx)	59
				Del Águila (2005)	80 – 84.2
Penetración	[1/10 mm]	INV E-706	2.7	IDU 200-11	80 - 100
				Del Águila (2005)	3.0 – 7.0
Ductilidad	[cm]	INV E-702	4.0	IDU 200-11	100
				Del Águila (2005)	1.5 – 4.0
Viscosidad	[cP]	INV E-717	-	IDU 200-11	650
				Del Águila (2005)	1608

Las memorias de los ensayos de laboratorio realizados se presentan en el Anexo D.

▪ Contenido de asfalto – Extracción (INV E-732)

En lo que concierne a mezclas asfálticas convencionales como las mezclas densas en caliente (MD10, MD12 y MD20), que generalmente se emplean como capa de rodadura en las vías de la ciudad de Bogotá, el contenido de cemento asfáltico óptimo varía entre 4.8 y 5.4%.

De acuerdo con lo anterior se tiene que el contenido de asfalto extraído (5.0%) se encuentra dentro del rango de valores típicos. Es importante garantizar adecuados contenidos de asfalto ya que un bajo contenido puede ocasionar endurecimiento rápido y desintegración por pérdida de agregado, oxidación acelerada e incremento de la permeabilidad; mientras que un exceso de asfalto conlleva procesos de exudación, ondulaciones, ahuellamientos, afloramientos y poca resistencia al deslizamiento.

Del Águila (2005), caracteriza el asfalto recuperado de varias carpetas en servicio de vías nacionales peruanas, obteniendo contenidos de asfalto para cuatro muestras del 4.7%, 5.0%, 5.1% y 6.0%; estos tres primeros valores son muy similares al resultado obtenido en los ensayos efectuados, con respecto al último valor se puede asociar a un posible exceso de asfalto en la mezcla existente.

▪ **Recuperación del asfalto de una solución utilizando el rotavapor (INV E-759)**

Para poder evaluar las diferentes propiedades del asfalto contenido en el RAP, se procedió a recuperar muestras de una solución de asfalto y solvente (tricloretileno), empleando el equipo de rotavapor del laboratorio IEI de la Universidad Nacional. El uso del rotavapor garantiza la minimización de los cambios en las propiedades del asfalto envejecido durante el proceso de recuperación, ya que crea una atmosfera de CO₂ (Dióxido de carbono) que desplaza el oxígeno en la cámara donde se separa el solvente del asfalto, con lo que se garantiza que el asfalto extraído no se someterá a una oxidación mayor durante el proceso de extracción por efectos de exposición al oxígeno.

▪ **Peso específico del asfalto (INV E-711)**

Con relación a las especificaciones técnicas de construcción, no existen requerimientos mínimos en cuanto a peso específico se refiere. En lo que concierne a valores típicos el peso específico, se tiene que generalmente varían entre 1.30 y 1.40.

De acuerdo con lo anterior se tiene que el peso específico del asfalto (1.36) se encuentra dentro del rango de valores típicos, no obstante, este valor no se asocia a una determinada calidad del asfalto evaluado por lo cual no es un criterio de especificación.

El peso específico del asfalto varía según su origen y proceso de destilación, sirve para determinar los vacíos en las mezclas asfálticas para pavimentos compactados, así mismo, se utiliza en la transformación de peso o volumen puesto que la dosificación de las mezclas se basa generalmente en una relación de volumen.

- **Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola) (INV E-712)**

En la especificación técnica IDU 200-11 se establece para el cemento asfáltico, valores mínimos del punto de ablandamiento según el tipo de asfalto de 49°C, 45°C y 42°. Así mismo, en dicha especificación se definen valores máximos del punto de ablandamiento de 59°C, 55°C y 22°C, dependiendo del tipo de asfalto.

El valor para el punto de ablandamiento (90.1 °C) indica que el asfalto se encuentra severamente endurecido, asociado a un comportamiento elástico remanente casi nulo, lo que es un comportamiento propio de asfaltos envejecidos con un alto grado de oxidación. Este valor obtenido nos indica que el material ha perdido su tendencia natural a fluir cuando se encuentra sometido a elevadas temperaturas, lo cual era de esperarse considerando que este asfalto dentro de la mezcla asfáltica ya ha cumplido con su vida útil de servicio.

Del Águila (2005) obtiene valores del punto de ablandamiento que varían entre 80 y 84.2°C para asfalto recuperado de carpetas en servicio de vías nacionales peruanas. Estos valores indican que el asfalto recuperado presenta un menor envejecimiento en comparación con los resultados de esta investigación y por ende se infiere que podría tener una mayor elasticidad remanente, lo cual indica que es más susceptible al cambio de temperatura que el asfalto que se está caracterizando en este estudio.

- **Penetración de los materiales asfálticos INV E-706**

En la especificación técnica IDU 200-11 se establece para el cemento asfáltico, valores mínimos de penetración de 40, 60 y 80 [1/10 mm-decimas de milímetro] y valores máximos del punto de penetración de 50, 70 y 100 [1/10 mm] (dependiendo del tipo de asfalto); por otro lado en la especificación de construcción INVÍAS 410-13 el rango de valores mínimos se encuentra entre 60 y 80 [1/10 mm] y el rango de valores máximos varía entre 70 y 100 [1/10 mm].

De acuerdo con lo anterior se observa que el rango de valores en el cual se encuentra el cemento asfáltico recuperado se encuentra muy apartado de los requerimientos máximos

y mínimos de penetración en referencia a las especificaciones, lo cual permite evidenciar el alto grado de oxidación y envejecimiento derivado del tiempo de servicio del pavimento.

El valor de penetración (2.7 [1/10 mm]) indica que el asfalto presenta un comportamiento elástico muy limitado, el cual es propio de asfaltos envejecidos con un alto grado de oxidación. De este valor puede concluirse que la susceptibilidad del asfalto a los cambios de temperatura ha disminuido considerablemente, por lo que se torna muy quebradizo, se agrieta gradualmente y se deteriora.

Del Águila (2005), encuentra que los valores de penetración para el cemento asfáltico recuperado de una carpeta en servicio, varían entre 3.0 y 7.0 [1/10 mm]; estos valores indican que el asfalto recuperado en esta investigación se encuentra más endurecido que el mencionado. Este análisis se contrasta observando la menor dureza del asfalto ensayado por Del Águila (2005), se asocia al tipo de asfalto que se utilizó en la elaboración de la mezcla asfáltica de la cual se recuperó el asfalto (penetración 60-70), que es un asfalto más rígido al que se utiliza generalmente en ciudades de clima frío como Bogotá (penetración 80-100).

- **Ductilidad de los materiales asfálticos ASTM D-113 (INV E-702)**

Tanto en la especificación técnica IDU 200-11 como en la especificación de construcción INVÍAS 410-13, se establece para el cemento asfáltico virgen valores mínimos de ductilidad de 100 cm.

En la investigación de Del Águila (2005), se caracteriza el asfalto recuperado de varias carpetas en servicio en vías nacionales peruanas, obteniendo valores de ductilidad que varían entre 1.5 cm y 4.0 cm. Para esta investigación se obtuvo también un valor de 4.0 cm en el ensayo de ductilidad, no obstante, el valor de 1.5 cm indica que el asfalto recuperado se encuentra más endurecido que el asfalto que se está caracterizando en este estudio, lo cual puede asociarse al tipo de asfalto utilizado en la elaboración de la mezcla que caracterizó Del Águila en sus estudios.

El valor de ductilidad obtenido en el ensayo (4 cm) indica, como ya se reseñó para los ensayos de punto de ablandamiento y penetración, que el asfalto se encuentra bastante endurecido y presenta un comportamiento elástico nulo, el cual es propio de asfaltos envejecidos con un alto grado de oxidación. Este valor obtenido indica que el asfalto ha perdido casi en su totalidad la capacidad de deformarse o estirarse sin romperse, bajo la acción de una fuerza a manera de que se obtengan alambres o hilos, es decir, el asfalto ha pasado de ser un material dúctil a volverse frágil, el cual no presenta una fase de fluencia típica de materiales viscoelásticos por lo que tiende a ser más quebradizo y susceptible a la presencia de agrietamientos.

▪ **Viscosidad Brookfield - Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional ASTM D-4402 (INV E-717)**

En la especificación técnica IDU 200-11 se establece para el cemento asfáltico virgen, valores mínimos de viscosidad a 60°C de 200, 150 y 100 Pa-s (dependiendo del tipo de asfalto) y valores máximos de viscosidad a 60°C de 400, 300 y 200 Pa-s; por otro lado en la especificación de construcción INVÍAS 400-13 los valores mínimos son 150 y 100 Pa-s. Adicionalmente en la especificación técnica IDU 200-11 se establece para el cemento asfáltico, valores mínimos de viscosidad a 135°C de 0.27, 0.22 y 0.15 Pa-s (dependiendo del tipo de asfalto) y valores máximos de viscosidad a 135°C de 0.65, 0.45 y 0.40 Pa-s.

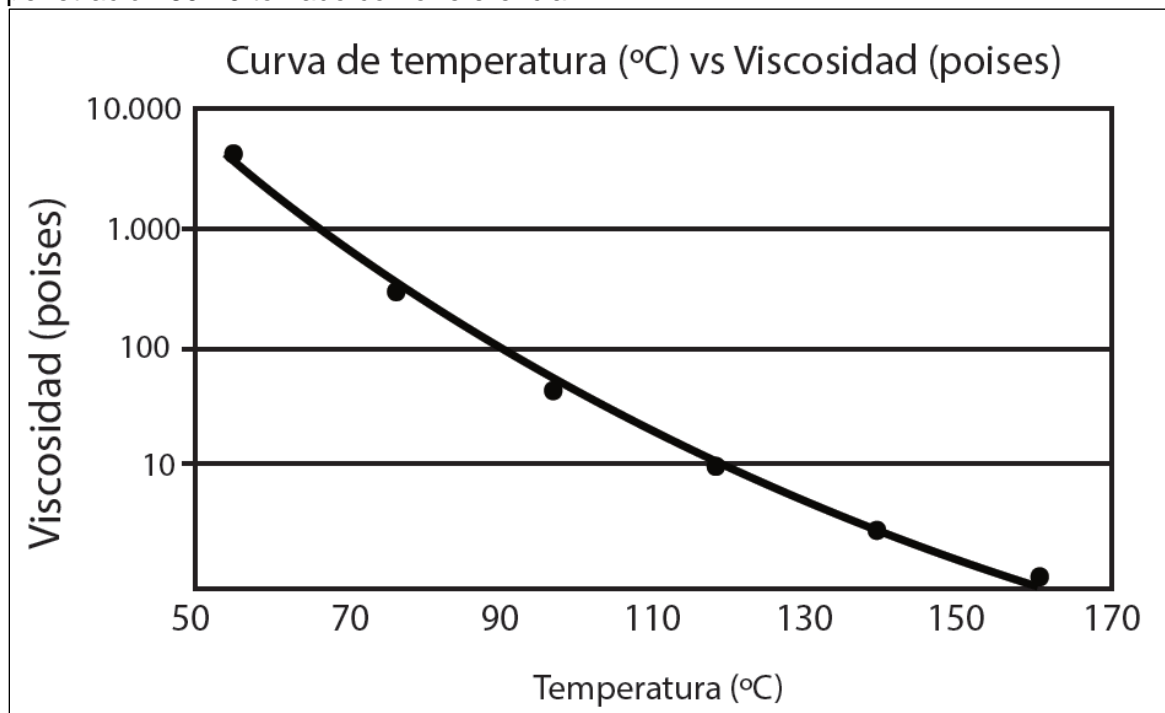
La inviabilidad de obtener algún valor de viscosidad se asocia, como ya se reseñó para los anteriores ensayos, a que el asfalto se encuentra endurecido y presenta un comportamiento elástico remanente muy limitado, el cual es propio de asfaltos envejecidos con un alto grado de oxidación. Para este tipo de asfaltos es de esperarse valores elevados de viscosidad, lo cual indica que el asfalto ha perdido su manejabilidad y susceptibilidad a los cambios de temperatura (se ha rigidizado), y por ende su capacidad a resistir deformaciones ha disminuido por lo que tiende a agrietarse y a presentar un comportamiento frágil.

Considerando lo descrito anteriormente, no se pudo establecer un índice de envejecimiento como se proponía en la 1.1.1 mediante la aplicación de la Ecuación 2. Sin embargo se estimó un valor de viscosidad obtenido de correlaciones logradas a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización descritos anteriormente, esto

es, comparando los valores obtenidos en esta investigación con los valores encontrados por Del Águila (2005). El valor asumido para la viscosidad 1608 cP (135 °C) se escogió considerando un cemento asfáltico ensayado por Del Águila (2005), que tiene como valor de ductilidad 4.0 cm y de penetración 3.0 [0.1 mm], los cuales con valores muy parecidos a los logrados en esta investigación para el cemento asfáltico estudiado.

De acuerdo con los valores de viscosidad presentados por MPI Ltda. (Manufacturas y Procesos Industriales Ltda.), los cuales se pueden observar en la Figura 15, la viscosidad reportada para un asfalto virgen de penetración 60-70 a 135°C, es de 8 Poises, lo que equivale a 800 cP

Figura 15: Valores de Viscosidad reportados por la MPI Ltda. para un asfalto de penetración 60-70 tomado como referencia.



Fuente: MPI Ltda.

Luego de aplicar la Ecuación 2 (Índice de envejecimiento = $1608 \text{ cP} / 800 \text{ cP}$) se estimó un valor de 2.01 [adimensional] para el índice de envejecimiento, el cual se encuentra por debajo de 5.0, que es el valor de la relación máxima estipulada en la especificación técnica IDU 200-11 (valor de referencia). Dado que este índice de envejecimiento relaciona los valores de viscosidad a 60°C del asfalto luego de un tiempo de servicio y el

Luego de observar la Figura 16 se puede inferir que la influencia del procedimiento de fresado de las carpetas asfálticas se puede asimilar como una reducción significativa en el tamaño de la mayoría de partículas que inicialmente componían la mezcla densa, si se supone de antemano que cumplían con los parámetro establecidos para alguna de las tres granulometrías presentadas (MD10, MD12 y MD20).

3.4 Caracterización mecánica de la mezcla bituminosa reciclada en frío con cemento hidráulico (MBRF+CH)

Los resultados obtenidos para las características mecánicas y físicas de la mezcla reciclada, se compararon con las Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá D.C. (IDU-ET-2011), la cual establece requisitos para mezclas asfálticas en caliente y en frío, y con las Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo (INVIAS-2013), la cual establece requisitos de los agregados pétreos para mezclas densas en frío y caliente, y reciclado del pavimento existente en frío y caliente. Se escogieron estas especificaciones teniendo en cuenta que son las que más se asemejan al tipo de mezcla que se viene manejando. Así mismo se utilizaron los valores reportados por otros autores en sus investigaciones, haciendo claridad que algunas de ellas no corresponden a las mismas características de la mezcla asfáltica reciclada, sin embargo se consideraron significativas para efectos de comparación y análisis que se presentan a continuación.

Tabla 23: Niveles de tránsito IDU

Categoría de tránsito		Nivel de tránsito	
		Criterio 1 VPDo	Criterio 2 NAEE_80, millones
T0	Liviano	VPDo < 20	NAEE_80 < 0.2
T1		20 ≤ VPDo < 50	0.2 ≤ NAEE_80 < 0.5
T2	Medio	50 ≤ VPDo < 150	0.5 ≤ NAEE_80 < 1.5
T3		150 ≤ VPDo < 300	1.5 ≤ NAEE_80 < 3.0
T4	Pesado	300 ≤ VPDo < 750	3.0 ≤ NAEE_80 < 7.5
T5		VPDo ≥ 750	NAEE_80 ≥ 7.5

Fuente: Adaptado de la Especificación Técnica IDU 107-11.

Para efectos de comparación con las especificaciones técnicas de construcción y contraste con valores de referencia extraídos de otros estudios mencionados en esta

sección, se deberán tener en cuenta los niveles de tránsito especificados por el IDU y el INVÍAS, tal como se relacionan en la Tabla 23 y la Tabla 24 respectivamente. Adicionalmente se consideraran las definiciones de tránsito Pesado, Medio y Liviano como se muestran en las tablas ya mencionadas.

De acuerdo con la Especificación Técnica IDU 107-11 la abreviación “NAEE_80” se refiere al número de ejes equivalentes de 80 kN en el periodo de diseño en el carril de diseño. Así mismo la especificación aclara que la sigla “VPDo” se refiere al número de vehículos pesado por día en el carril de diseño, durante el primer año de servicio de las obras, donde vehículos pesados son buses y camiones de peso igual o mayor a 3.5 Toneladas.

Tabla 24: Niveles de tránsito INVÍAS

Nivel de tránsito		Descripción
NT1	Liviano	Corresponde a vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir es inferior a 0.5×10^6 ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño.
NT2	Medio	Corresponde a vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir oscila entre 0.5×10^6 y 5.0×10^6 ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño.
NT3	Pesado	Corresponde a vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir es superior a 5.0×10^6 ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño.

Fuente: Adaptado de la Especificación Técnica INVÍAS 100-13.

Para una correcta interpretación de las gráficas presentadas en las secciones subsiguientes, el lector deberá tener en cuenta que los valores de referencia presentados en cada gráfica fueron obtenidos de la revisión de cada estudio relacionado y constituye un valor constante representado por una línea recta dentro de la gráfica. Dicho valor fue escogido como referente para el tipo de mezcla que representa el estudio referenciado.

3.4.1 Ensayo Marshall (Estabilidad y flujo)

Una vez finalizada la fase de preparación de briquetas y posterior al curado de 7 días de las mismas, se procedió a fallarlas mediante la aplicación de la carga monotónica típica del ensayo, obteniendo los resultados que se muestran resumidamente en la Tabla 25 para la mezcla MBRF+CH_23 y la mezcla MBRF+CH_33.

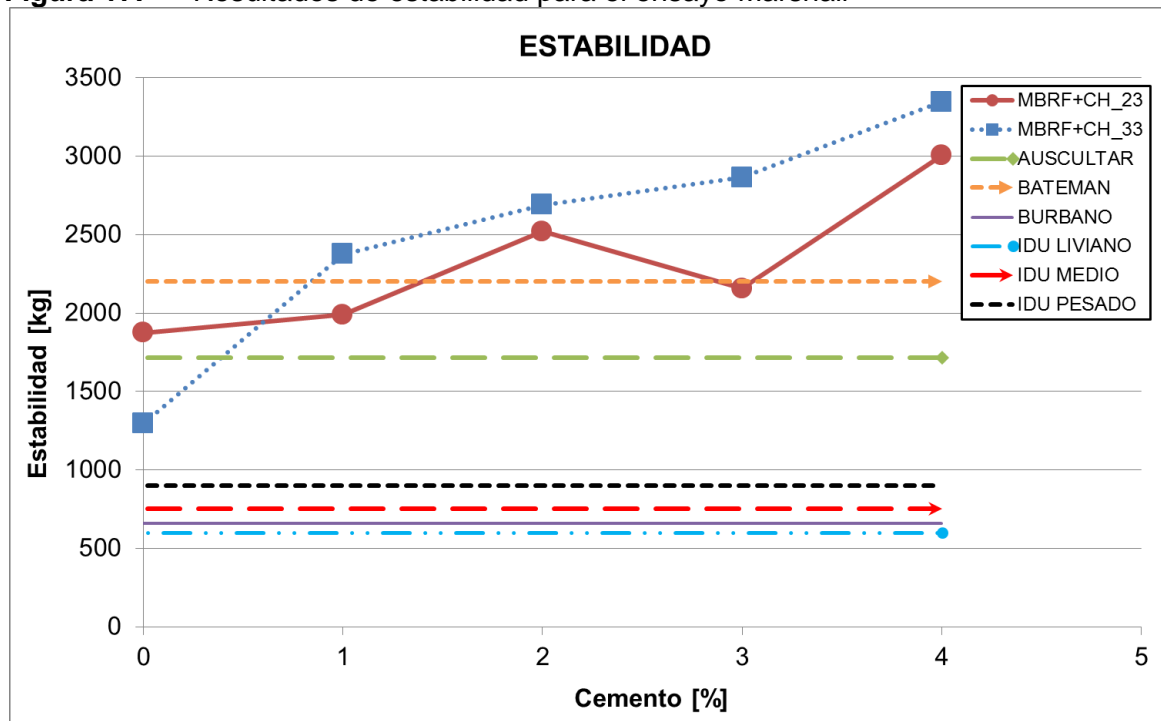
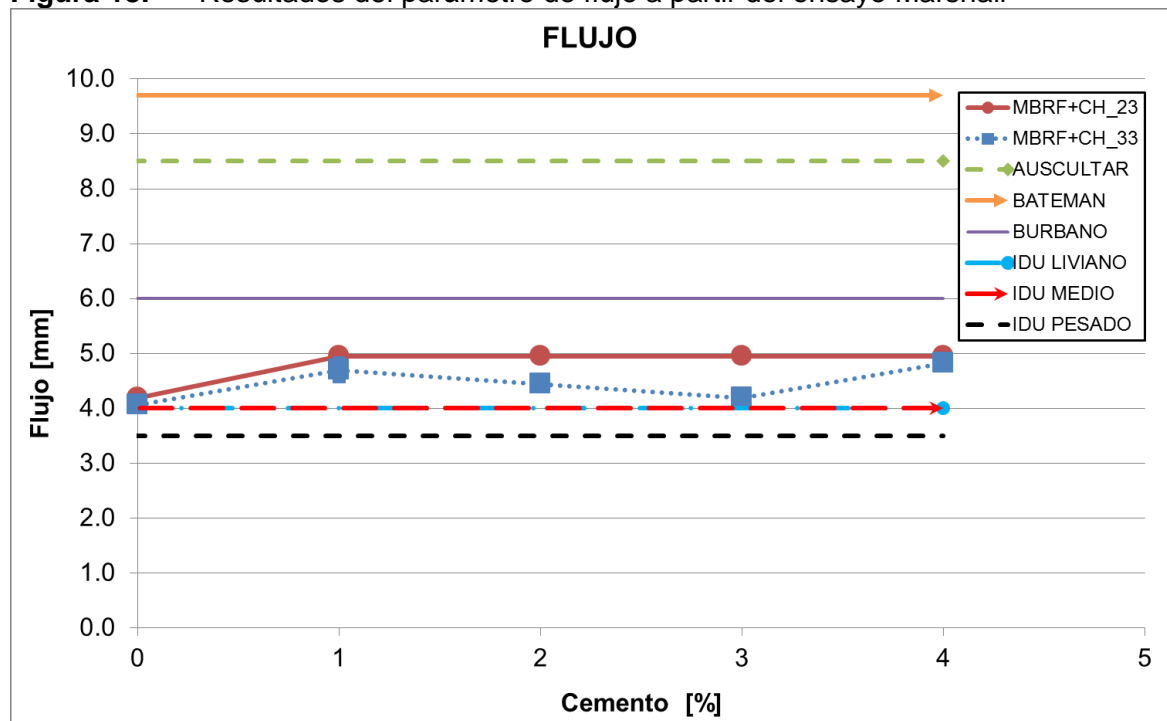
Complementariamente se presentan en la Figura 17 y la Figura 18, la interpretación gráfica de los resultados obtenidos en la medición de los parámetros de estabilidad y flujo para las mezclas recicladas. Estas gráficas se construyeron para comparar las tendencias de las dos mezclas MBRF+CH_23 y MBRF+CH_33 y presentar los resultados de los parámetros obtenidos para cada briqueta y los rangos de valores que permiten describir con claridad el comportamiento mecánico de las mezclas. Los parámetros que se presentan gráficamente son en su respectivo orden son la estabilidad y el flujo.

Tabla 25: Valores obtenidos en el ensayo Marshall

Mezcla	Cemento [%]	Briqueta	Estabilidad Promedio [kg]	Flujo Promedio [mm]
MBRF+CH_23	0	MSH23-0_1	1874	4.19
		MSH23-0_2		
	1	MSH23-1_1	1991	4.95
		MSH23-1_2		
	2	MSH23-2_1	2520	4.95
		MSH23-2_2		
	3	MSH23-3_1	2157	4.95
		MSH23-3_2		
	4	MSH23-4_1	3004	4.95
		MSH23-4_2		
MBRF+CH_33	0	MSH33-0_1	1294	4.06
		MSH33-0_2		
	1	MSH33-1_1	2377	4.70
		MSH33-1_2		
	2	MSH33-2_1	2689	4.45
		MSH33-2_2		
	3	MSH33-3_1	2864	4.19
		MSH33-3_2		
	4	MSH33-4_1	3346	4.83
		MSH33-4_2		

Las memorias de los ensayos de laboratorio realizados se presentan en el Anexo D.

Al observar la Figura 17 y la Figura 18 presentadas para los ensayos Marshall se evidencia que el aumento de la estabilidad de la mezcla es proporcional al aumento en el contenido de cemento, mientras que el flujo tiene una tendencia más conservadora presentando deformaciones constantes, del mismo orden de magnitud para distintos contenidos de cemento, como lo sugieren los resultados de la mezcla MBRF+CH_23.

Figura 17: Resultados de estabilidad para el ensayo Marshall**Figura 18:** Resultados del parámetro de flujo a partir del ensayo Marshall

Por otro lado, es importante anotar que el comportamiento más deseado lo representa la mezcla MBRF+CH_33, ya que presenta resistencias más elevadas y deformaciones menores que la de la mezcla MBRF+CH_23. Así mismo, la mezcla MBRF+CH_33 es más densa, presentando contenidos de vacíos menores que la mezcla MBRF+CH_23.

Considerando que en la normativa colombiana no se contemplan valores de aceptación para los parámetros del ensayo Marshall en cuanto a diseño de mezclas en frío con pavimento reciclado se refiere, la pertinencia de los ensayos realizados se verificó inicialmente mediante la consulta de ensayos tipo Marshall realizados en mezclas frías. Para lo cual se cita el diseño elaborado por la empresa AUSCULTAR LTDA, 2008.

Se compararon los resultados obtenidos para las condiciones más parecidas que se presentan en esta investigación, encontrando que para la mezcla de RAP + 3.61% emulsión CRL-1 + 3% agua obtuvieron una lectura de estabilidad de 1712 kg y el flujo de 8.5 mm. Estos resultados en órdenes de magnitud son muy parecidos a los que se obtuvieron en esta investigación para las mezclas con 0% en el contenido de cemento, como se observa en la Tabla 26. Con la excepción clara en el valor de la deformación que para este estudio fue del orden del 50% menor que la obtenida en el diseño citado. El mayor resultado del flujo indican que la mezcla asfáltica diseñada por AUSCULTAR LTDA tiene una menor resistencia a desplazarse y tenderá a sufrir de mayores deformaciones en comparación a lo obtenido para las mezclas MBRF+CH_23 y MBRF+CH_33.

Tabla 26: Valores referentes para el ensayo Marshall

Fuente	Estabilidad promedio [kg]	Flujo promedio [mm]	Tipo de mezcla
Auscultar Ltda, 2008	1712	8.5	Mezcla bituminosa reciclada en frío
Bateman Ingeniería, 2013	2200	9.7	Mezcla bituminosa reciclada en frío
Burbano, 2011	660	6.6	Mezcla bituminosa reciclada en frío

En los estudios elaborados por Bateman Ingeniería (2013), se propone el diseño del material de RAP estabilizado con emulsión, obteniendo valores para la estabilidad de 2200 y 1600 kg en condición seca y húmeda respectivamente. En cuanto al valor del flujo

se obtuvo valores de 9.7 y 10.2 mm; estos valores de estabilidad se asemejan a los obtenidos en los ensayos efectuados para esta investigación. Considerando el valor del flujo obtenido para el diseño citado, se puede inferir que la mezcla asfáltica diseñada por Bateman Ingeniería tenderá a sufrir mayores deformaciones en comparación a lo obtenido para las mezclas MBRF+CH_23 y MBRF+CH_33, tal como se verificó para los ensayos de Auscultar Ltda.

Burbano (2011), en su investigación se propone el diseño del material de RAP estabilizado con emulsión, para el cual obtiene valores de estabilidad que variaban entre 98 y 585 kg y para el flujo entre 4.8 y 7.3 mm utilizando compactación estática en la fabricación de la mezcla. Para el caso de compactación dinámica, la estabilidad variaba entre 498 y 660 kg y el flujo entre 5.8 y 6.6 mm; estos menores valores de estabilidad y mayores resultados del flujo indican que la mezcla asfáltica del estudio citado tiene una menor resistencia a desplazarse y tenderá a sufrir de mayores deformaciones en comparación a lo obtenido en los ensayos efectuados.

Por otro lado se buscó contrastar los parámetros obtenidos en el ensayo Marshall para la mezcla bituminosa reciclada a la luz de las especificaciones para mezclas asfálticas. Es así como se encontró que la especificación técnica IDU 510-11 (Tabla 510.8 – Criterios de diseño de la mezcla) establece para mezclas asfálticas densas, semidensas y gruesas, los valores mínimos de estabilidad [kg] dependiendo de la categoría del tránsito, de 600 (Tránsito liviano), 750 (Tránsito medio) y 900 (Tránsito pesado). En lo que concierne al flujo el valor mínimo es de 2.0 mm y los valores máximos son 3.5 y 4.0 mm. Así mismo para el contenido de vacíos en la mezcla la especificación establece que para capas de base e intermedias deberán encontrarse en el rango de 4% y 6%, para cualquier categoría de tránsito.

De acuerdo con lo anterior puede inferirse que la mezcla asfáltica reciclada cumple con los requisitos mínimos de estabilidad para los contenidos de agua y cemento establecidos (varía entre 1294 y 3346 kg); en lo que respecta a valores de flujo para ninguno de los contenidos de agua y cemento establecidos cumple con los parámetros establecidos en la especificación (varía entre 4.064 y 4.953 mm).

Podría concluirse luego de estas comparaciones que las mezclas bituminosas recicladas en frío MBRF+CH, presentan un comportamiento favorable en cuanto a ganancia de resistencia se refiere, considerando que presentan valores altos de estabilidad con respecto a la especificación y a los valores de referencia de diseño.

Consecuentemente se puede deducir que para la mezcla MBRF+CH_33 la estabilidad y el flujo presentan un comportamiento más favorable con relación a la MBRF+CH_23, pues los valores de resistencia son mayores para la primera; por otro lado se evidencia una relación directamente proporcional entre las adiciones de cemento y el aumento en la resistencia de la mezcla.

Un mayor contenido de cemento y de agua contribuyen a que la mezcla asfáltica reciclada tenga una mayor capacidad para resistir desplazamientos y deformaciones a causa de la cargas del tráfico, es decir, una mayor estabilidad. La estabilidad depende de la fricción asociada a las características propias del agregado y a la cohesión interna que depende de la capacidad del ligante del asfalto, que a su vez mejora con la adición de agua y cemento.

Aun cuando la diferencia en los valores de flujo para las mezclas MBRF+CH_23 y MBRF+CH_33 no es significativa, los valores obtenidos oscilan entre 4.0 y 5.0 mm, cerca del valor superior de especificación para el caso de tránsito bajos y medios, lo cual indica que la mezcla presenta una mayor plasticidad a la considerada en el diseño de mezclas asfálticas en caliente. Sin embargo, en vista de los buenos valores de estabilidad alcanzados por la mezcla se puede inferir que la mezcla asfáltica no tenderá a deformarse tan fácilmente como ocurre con mezclas de alto valor de flujo y baja estabilidad.

3.4.2 Ensayo de Tracción Indirecta

Una vez finalizada la fase de preparación de briquetas y posterior al curado de 7 días en seco y 7 días húmedo de las mismas, se procedió a fallarlas mediante la aplicación de una carga constante diametral, obteniendo los resultados que se muestran resumidamente en la Tabla 27 para la mezclas MBRF+CH_23 y MBRF+CH_33.

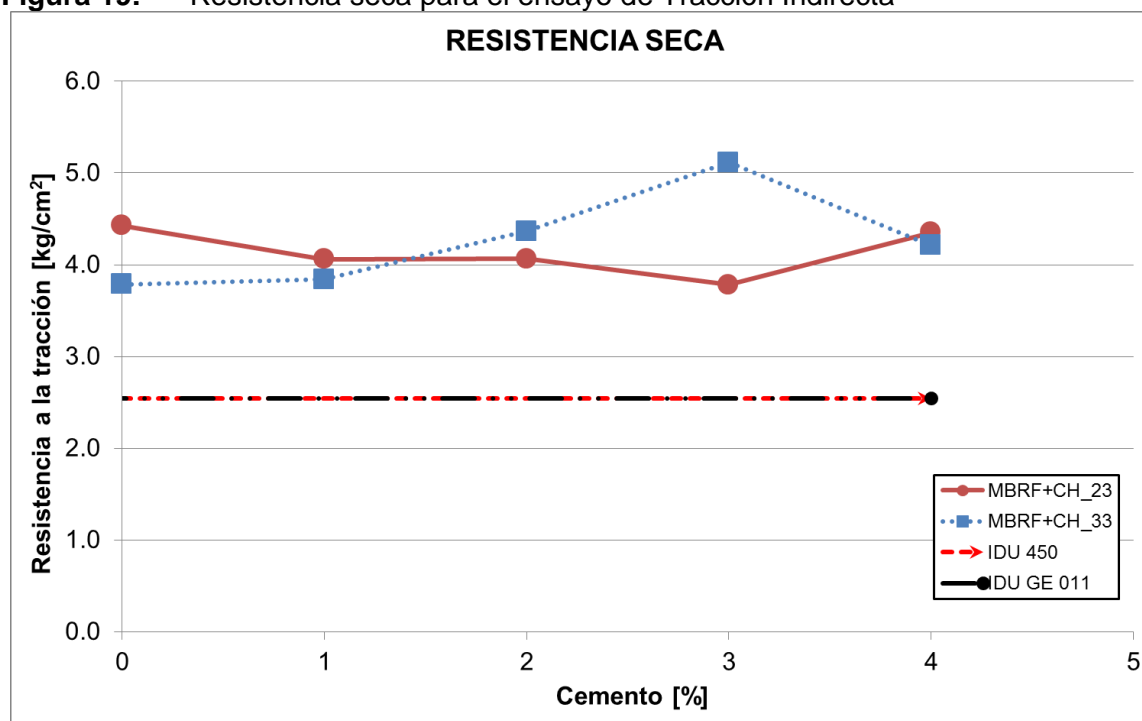
Al igual que con el ensayo Marshall, se presenta la interpretación gráfica de los resultados obtenidos en los ensayos de Tracción Indirecta para las mezclas recicladas, en la Figura 19, la Figura 20 y la Figura 21. Las tendencias para cada parámetro mostradas en las figuras servirán para discutir el comportamiento mecánico de la mezcla. Los parámetros que se presentan gráficamente son en su respectivo orden, la resistencia seca, la resistencia húmeda y el índice de resistencia conservada.

Tabla 27: Valores obtenidos en el ensayo Tracción Indirecta

Mezcla	Cemento [%]	Briqueta	Resistencia promedio a la tracción indirecta [kg/cm²]	Índice de resistencia conservada promedio [%]
MBRF+CH_23	0	TI23-0_1	4.43	29
		TI23-0_4		
		SM-TI23-0_2	1.30	
		SM-TI23-0_3		
	1	TI23-1_1	4.06	48
		TI23-1_2		
		SM-TI23-1_3	1.94	
		SM-TI23-1_4		
	2	TI23-2_3	4.07	70
		TI23-2_4		
		SM-TI23-2_1	2.83	
		SM-TI23-2_2		
	3	TI23-3_2	3.78	83
		TI23-3_4		
		SM-TI23-3_1	3.12	
		SM-TI23-3_3		
	4	TI23-4_1	4.35	90
		TI23-4_4		
		SM-TI23-4_2	3.89	
		SM-TI23-4_3		
MBRF+CH_33	0	TI33-0_1	3.79	27
		TI33-0_3		
		SM-TI33-0_2	1.04	
		SM-TI33-0_4		
	1	TI33-1_2	3.84	59
		TI33-1_3		
		SM-TI33-1_1	2.26	
		SM-TI33-1_4		
	2	TI33-2_3	4.36	67
		TI33-2_4		
		SM-TI33-2_1	2.94	
		SM-TI33-2_2		
	3	TI33-3_3	5.11	64
		TI33-3_4		
		SM-TI33-3_1	3.26	
		SM-TI33-3_2		

Mezcla	Cemento [%]	Briqueta	Resistencia promedio a la tracción indirecta [kg/cm²]	Índice de resistencia conservada promedio [%]
	4	TI33-4_2	4.21	87
		TI33-4_4		
		SM-TI33-4_1	3.68	
		SM-TI33-4_3		

Figura 19: Resistencia seca para el ensayo de Tracción Indirecta

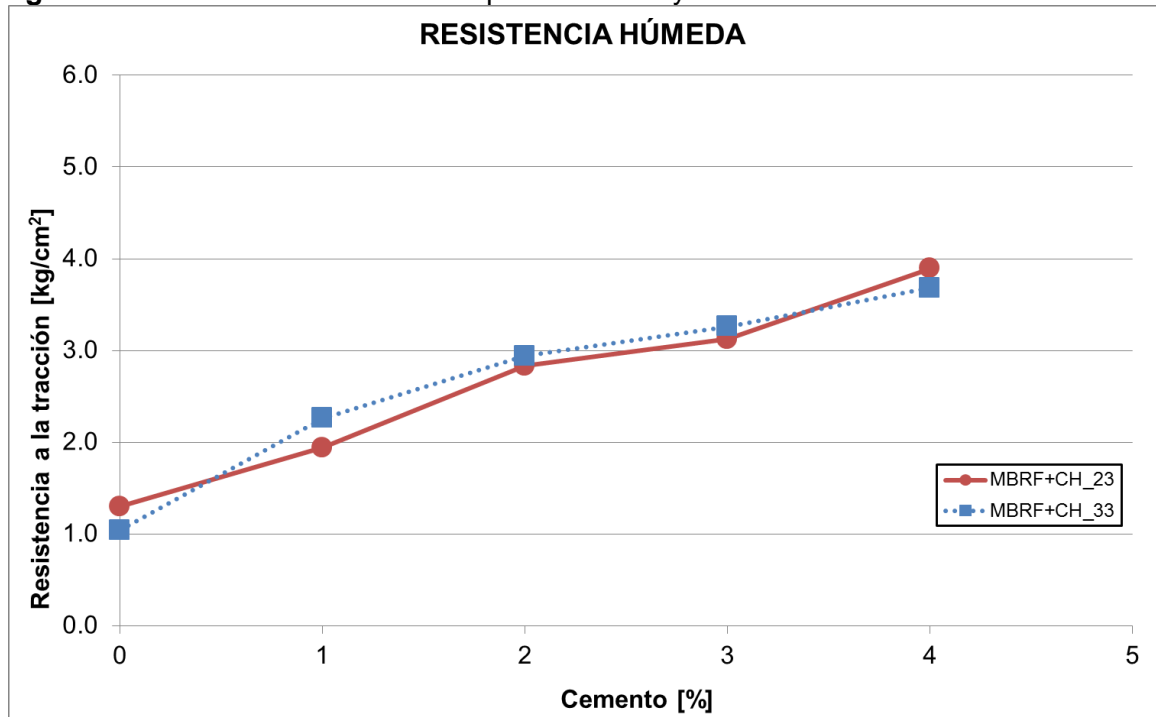


Al observar la Figura 19 que compara las resistencias secas de las mezclas, se evidencia que el contenido de agua influencia en gran manera el comportamiento de la mezcla, ya que la tendencia de resistencia para la mezcla MBRF+CH_23 es decreciente conforme aumenta el contenido de cemento, mientras que para la mezcla MBRF+CH_33, la resistencia tiende a aumentar con mayores adiciones de cemento. Por otro lado la resistencia húmeda tiene siempre un comportamiento favorable de aumento de resistencia proporcional al aumento de cemento, independientemente del contenido de agua en la mezcla.

Lo anterior evidencia la importancia que tiene la reacción del agua con el cemento en la mezcla para el incremento de la resistencia, lo que permite afirmar, con respecto a la resistencia seca, que la cantidad de agua en la mezcla MBRF+CH_23 no fue la suficiente

para lograr la reacción esperada con las adiciones de cemento. Lo anterior se puede confirmar al observar el comportamiento de las mezclas presentado en la Figura 20, ya que independiente del contenido de agua en las mismas, tanto la mezcla MBRF+CH_23 como la mezcla MBRF+CH_33 presentaron aumento en la resistencia al incrementar la adición de cemento. Esto último se debe a que estas briquetas se curaron en estado sumergido, permitiendo una correcta reacción del cemento con el agua dentro de la mezcla.

Figura 20: Resistencia húmeda a partir del ensayo de Tracción Indirecta

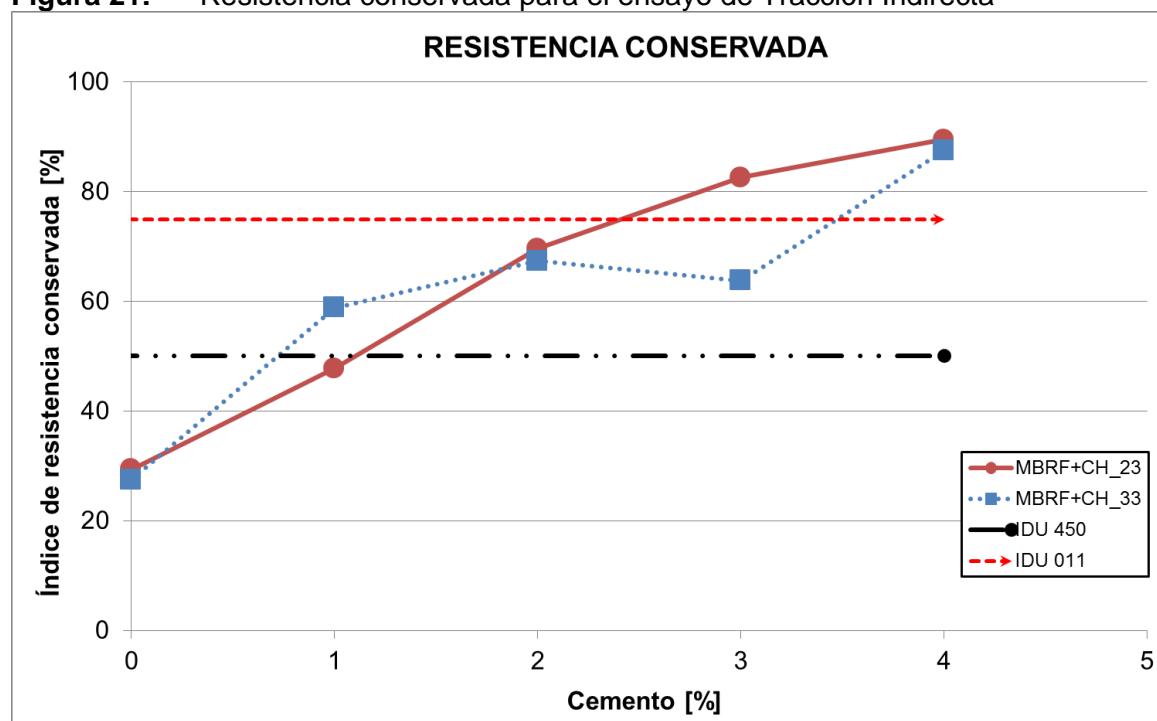


El índice de resistencia conservada de las mezclas se determina mediante la relación entre la resistencia húmeda y la resistencia seca, expresándola como un porcentaje de esta última. Al depender de la resistencia húmeda que aumenta conforme se adiciona más cemento a la mezcla, el índice también tiene un comportamiento favorable para la mezcla MBRF+CH_33. Para la mezcla MBRF+CH_23 se muestra un comportamiento constante para los contenidos de cemento entre 1% y 3%, debido a que la resistencia seca tendió a disminuir con los incrementos de cemento en la mezcla.

En contraste con lo expresado por Díaz (2005), quien afirma que las adiciones de ligantes hidráulicos como el cemento portland y la cal no mejoran las características de

las mezclas bituminosas recicladas en frío, sino que tienen un efecto negativo a raíz de que se rigidiza la mezcla y permite menores deformaciones en la rotura favoreciendo un comportamiento frágil, en esta investigación se establece que la adición de cemento a este tipo de mezclas ayuda a mejorar las especificaciones de las mismas, favoreciendo la adquisición de resistencia a corto plazo y haciéndolas menos susceptibles al efecto del agua.

Figura 21: Resistencia conservada para el ensayo de Tracción Indirecta



En el trabajo de investigación de Díaz (2005), se utiliza material de RAP sin adición de agregados vírgenes, agua, cal, cemento y emulsión asfáltica, para la fabricación de una mezcla asfáltica en frío. En la citada investigación se empleó un compactador estático que consiste en una prensa que imparte una presión de 6 Ton para la conformación de las briquetas que serán ensayadas; los resultados de los ensayos de tracción indirecta para el caso de una mezcla reciclada con emulsión y adiciones de cemento de 1% al 3%, variaron entre 14.11 y 17.44 kg/cm² para el curado de la mezcla en seco. Por otro lado en esta investigación se sometieron algunas briquetas con 2% de contenido de cemento a curado en cámara húmeda obteniendo valores entre 9.01 y 11.63 kg/cm². Lo anterior indica un comportamiento inverso al que se registró en los ensayos practicados en esta investigación. Evidentemente los valores de resistencia registrados por Díaz (2005), son

de un orden de magnitud mucho mayor al observado en los resultado obtenidos para las mezclas MBRF+CH_23 y MBRF+CH_33, lo cual puede atribuirse a diversas variables como el método de compactación empleado, el tipo de cemento asfáltico, entre otros.

Por otro lado Reyes-Ortiz et.al., (2012), en su trabajo de investigación estudia el comportamiento de mezclas asfálticas frías fabricadas con agregados vírgenes y considerando granulometrías colombianas. En lo que respecta a granulometrías tipo INVÍAS los resultados para la resistencia seca variaron entre (0.15 y 0.40 kPa) 0.0015 y 0.0040 kg/cm² y para resistencia húmeda se evidenciaron valores entre (0.10 y 0.65 kPa) 0.0010 y 0.0065 kg/cm², reportándose los mayores valores para las mezclas con adición de cemento. En cuanto a las granulometrías tipo IDU los resultados variaron entre (0.10 y 0.40 kPa) 0.0010 y 0.0040 kg/cm² y para resistencia húmeda se evidenciaron valores entre (0.10 y 0.58 kPa) 0.0010 y 0.0058 kg/cm², reportándose también los mayores valores para las mezclas con adición de cemento. En lo que respecta a la resistencia conservada se reporta que para todos los casos en que se adicionó cemento la mezcla cumplió con los requerimientos mínimos establecidos en la especificación, mientras que para los casos donde no se adiciono cemento la mezcla no cumplió con el parámetro de aceptación de la resistencia conservada.

Tabla 28: Valores referentes para el ensayo de Tracción Indirecta

Fuente	Resistencia seca [kg/cm ²]	Resistencia húmeda [kg/cm ²]	Tipo de mezcla
Díaz, 2008	17.44	11.63	Mezcla bituminosa reciclada con adiciones de cemento y cal
Reyes-Ortiz et.al., 2012	0.0040	0.0065	Mezcla densa en frio con agregado virgen y adición de cemento

Tal como se muestra en la Tabla 26, los órdenes de magnitud de la resistencia a la tracción indirecta presentados en las investigaciones de Díaz (2005) y Reyes-Ortiz et.al., (2012), se encuentran alejados por ambos extremos (superior e inferior) a los resultados encontrados en esta investigación, por lo que no se consideró representativo incluirlos dentro de la interpretación gráfica. Sin embargo los valores analizados son de gran interés para efectos de comparación en el comportamiento de las mezclas.

Como parámetro de diseño, la especificación IDU 450-05 establece que la resistencia de las briquetas curadas en seco debe ser mayor o igual a 250 kPa (2.54 kg/cm^2) y que la resistencia conservada debe ser mayor o igual al 50%. De acuerdo con esto se evidencia que las resistencias alcanzadas son del orden de 50% mayores a las especificadas por la norma, aun para las mezclas sin contenidos de cemento. Sin embargo solo las mezclas con contenidos de cemento mayores e iguales a 2% cumplen con el parámetro de la resistencia conservada, concluyendo así que el cemento mejora la calidad de las mezclas, haciéndolas menos susceptibles al efecto del agua y por ende más durables.

Así mismo en la especificación técnica IDU GU-GE-011 se establece para la mezcla asfáltica reciclada con cemento, valores mínimos a la Tracción Indirecta a 7 días de 0.25 MPa (2.54 kg/cm^2) y en lo concerniente al índice de resistencia conservada a los 7 días de fraguado, se establece un valor mínimo del 75%. De acuerdo con lo anterior se observa que la mezcla asfáltica reciclada cumple con los requerimientos mínimos de resistencia a la tracción indirecta para los contenidos de agua y cemento evaluados (varían entre 3.78 y 5.11 kg/cm^2); en lo que respecta al índice de resistencia conservada, para la mezcla MBRF+CH_23 sólo cumplen las adiciones de cemento del 3% y 4%, para la mezcla MBRF+CH_33 sólo cumple para un contenido de cemento del 4%.

Considerando los resultados de los ensayos obtenidos para la mezcla MBRF+CH_33, puede inferirse que generalmente la resistencia a la tracción indirecta aumenta y el índice de resistencia conservada disminuye, con relación a la mezcla MBRF+CH_23; por otro lado un mayor contenido de cemento contribuye tanto al aumento de la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla como el índice de resistencia conservada.

Un mayor contenido de agua y principalmente de cemento, contribuye a que la mezcla asfáltica reciclada desarrolle una mayor capacidad para resistir esfuerzos de tracción; esta mayor capacidad en la resistencia se relaciona con mayores valores de módulo de elasticidad estático y dinámico, mayor resistencia a la fisuración térmica, mayor resistencia a la fisuración por fatiga, y por ende menores deformaciones permanentes.

3.4.3 Evaluación de la influencia del tiempo de curado en la resistencia de la mezcla

Los resultados obtenidos en el ensayo de tracción indirecta para las briquetas compactadas con la metodología descrita en la sección 2.4.2 se presentan en la Tabla 29. Estos valores serán comparados con los resultados presentados en la sección 3.4.2, con el objetivo de evaluar la influencia en la resistencia de la mezcla, debida al tiempo de fraguado, en consideración a que se espera estudiar una ganancia eventual de resistencia en las briquetas con 23 días de curado adicionales a las briquetas presentadas en la sección 3.4.2.

Tabla 29: Valores obtenidos en el ensayo de tracción indirecta con 30 días de curado

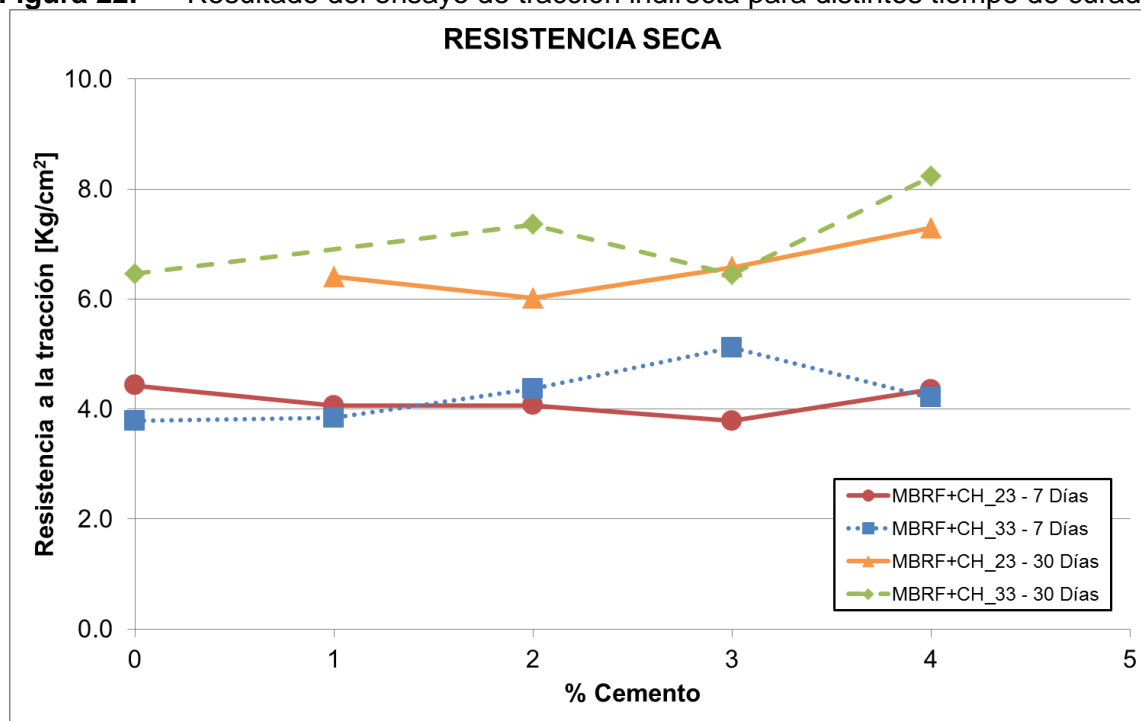
Mezcla	Cemento [%]	Briqueta	Resistencia a la Tracción Indirecta [kg/cm ²]
MBRF+CH_23	0	TI23-0_5	-
	1	TI23-1_5	6.40
	2	TI23-2_5	6.01
	3	TI23-3_5	6.58
	4	TI23-4_5	7.29
MBRF+CH_33	0	TI33-0_5	6.46
	1	TI33-1_5	-
	2	TI33-2_5	7.35
	3	TI33-3_5	6.45
	4	TI33-4_5	8.23

Es de aclarar que la metodología empleada para compactar las briquetas evaluadas a los 7 y 30 días fue distinta, lo que podría llegar a entenderse como un análisis poco representativo. No obstante para efectos de esta investigación se considera que para esta comparación se puede enfocar el análisis en los valores de resistencia, aun cuando los valores de contenido de vacíos de aire para las briquetas ensayadas a los 7 días son del orden de 8% y para las briquetas ensayadas a los 30 días son del orden de 10%.

En la Figura 22 se presenta la comparación de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción indirecta que involucran tiempos de fraguado distintos en las briquetas (75 golpes por cara para las briquetas ensayadas a los 30 días y 100 golpes por cara para las briquetas ensayadas a los 7 días). Lamentablemente las briquetas TI23-0_5 y TI33-1_5 se fracturaron accidentalmente antes de realizar el ensayo, motivo por lo que no se muestran los resultados.

Como era de esperarse las briquetas falladas a los 30 días lograron una mayor resistencia, aun cuando fueron compactadas con 75 golpes por cara. Se evidencia que en este periodo de tiempo adicional de fraguado para las briquetas de 75 golpes, la mezcla desarrollo una mayor resistencia. Sin embargo se observa que el orden de magnitud en el que aumento la resistencia (65%) es muy parecido en las briquetas con y sin cemento, por lo que podría inferirse que el cemento no aportó resistencia en el periodo de curado adicional.

Figura 22: Resultado del ensayo de tracción indirecta para distintos tiempo de curado



Lo anterior indica que el cemento incrementa la resistencia de la mezcla a corto plazo y que a mediano y largo plazo su aporte en la ganancia de resistencia no sería representativo, por lo que el aumento de resistencia en la mezcla en el periodo posterior a los 7 días iniciales de fraguado, podría atribuirse al curado propio de la emulsión asfáltica.

La influencia del tiempo de fraguado radica en que se observa un aumento significativo en la resistencia a la Tracción Indirecta, considerando que para la mezcla MBRF+CH_23 pasa de un rango entre 3.78 y 4.43 kg/cm² a un intervalo entre 6.01 y 7.29 kg/cm²; por

otro lado para la mezcla MBRF+CH_33 la resistencia pasa de un rango entre 3.79 y 5.11 kg/cm² a un intervalo entre 5.77 y 8.23 kg/cm². En ambos casos se obtienen los mayores valores de resistencia para los contenidos más altos de cemento (4%) y el comportamiento más deseable es el de la mezcla MBRF+CH_33.

Estos ensayos no son representativos para realizar objeciones respecto al efecto que puede tener la energía de compactación en el desempeño mecánico de la mezcla, ya que no se tuvo en cuenta para la realización de las pruebas y es una variable que no se estudia a fondo en esta investigación, como lo es el tiempo de curado de la mezcla. No obstante es importante resaltar que en los demás ensayos de resistencia, el tiempo de curado fue el mismo para todas las mezclas con el objetivo de que el tiempo de curado no alterara el estudio de la variación de la resistencia en función del aumento en el contenido de cemento.

3.4.4 Ensayo de Inmersión-Compresión

Al Igual que el ensayo de Tracción Indirecta, el de Inmersión-Compresión se emplea, entre otros, para determinar la afectación que tiene la resistencia de las mezclas asfálticas, por efectos del agua. Luego de someter la briquetas preparadas para el ensayo a la fuerza axial monotónica de compresión, se obtuvieron los resultados que se muestran resumidamente en la

Tabla 30 para las mezclas MBRF+CH_23 y MBRF+CH_33.

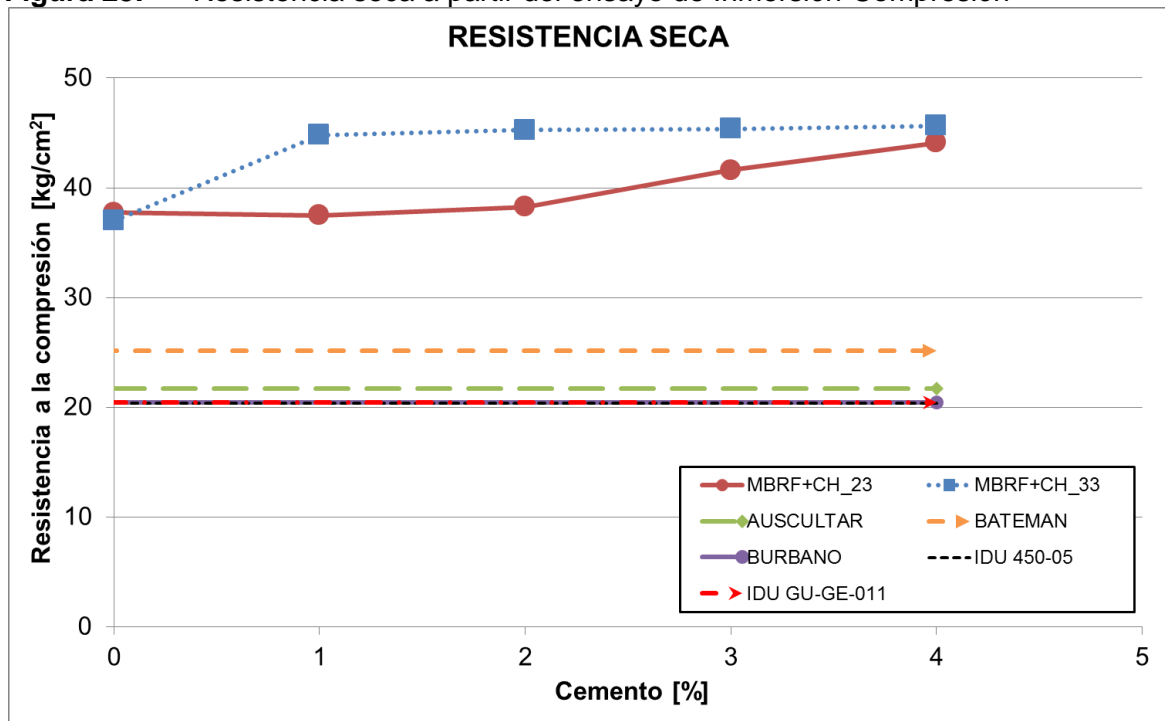
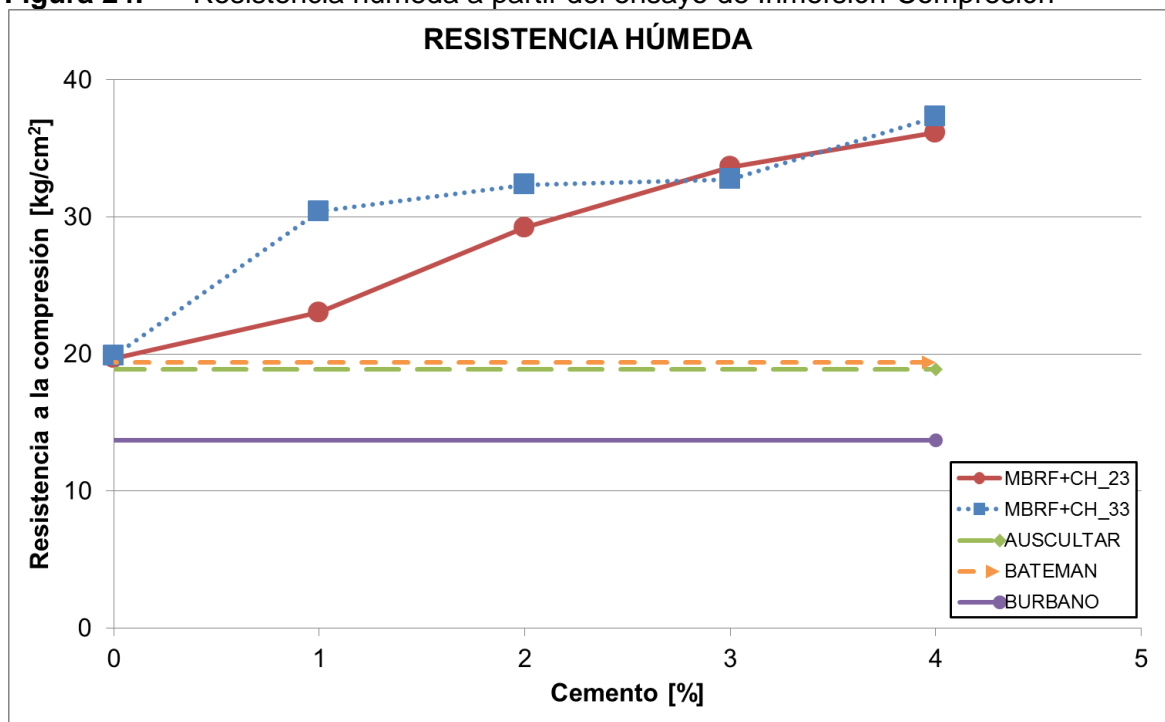
Al igual que con los ensayos Marshall y Tracción Indirecta, se presenta la interpretación gráfica de los resultados obtenidos en los ensayos de Inmersión-Compresión para las mezclas recicladas, en la Figura 23, la Figura 24 y la Figura 25. Las tendencias de cada parámetro mostradas en las figuras serán empleadas para la discusión del comportamiento mecánico de la mezcla. Los parámetros que se presentan gráficamente son en su respectivo orden, la resistencia seca, la resistencia húmeda y el índice de resistencia conservada.

Al observar la Figura 23 que compara las resistencias secas de las mezclas, se evidencia que la mezcla MBRF+CH_23 está influenciada claramente en su aumento de la resistencia por el cemento, mientras que la mezcla MBRF+CH_33 parece no tener

alteraciones en la resistencia entre el 1% y 4% en el contenido de cemento. Este comportamiento discrepa de lo observado en los ensayos Marshall y Tracción Indirecta, donde la mezcla MBRF+CH_23 se caracterizaba por presentar comportamientos deficientes al aumentar el contenido de cemento adicionado.

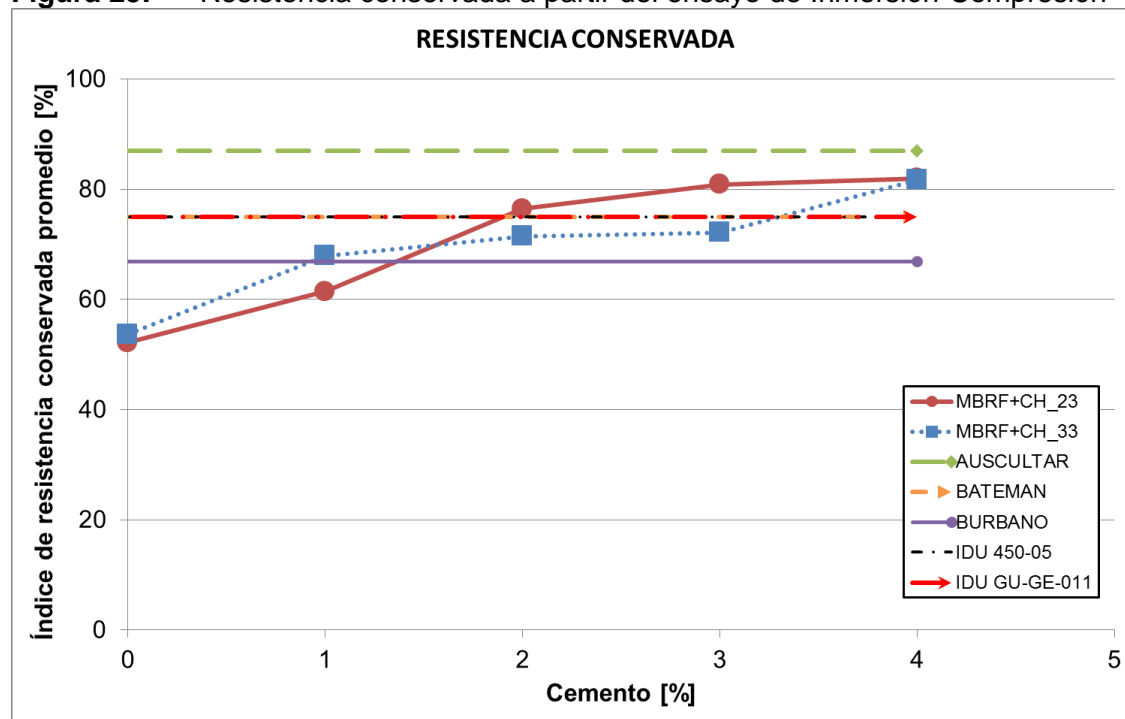
Tabla 30: Valores obtenidos en el ensayo de Inmersión - Compresión

Mezcla	Cemento [%]	Briqueta	Resistencia promedio a la Compresión [kg/cm²]	Índice de resistencia conservada promedio [%]
MBRF+CH_23	0	IC23-0_3	37.73	52
		IC23-0_4		
		SM-IC23-0_1	19.69	
		SM-IC23-0_2		
	1	IC23-1_1	37.47	61
		IC23-1_4		
		SM-IC23-1_2	23.03	
		SM-IC23-1_3		
	2	IC23-2_1	38.25	76
		IC23-2_4		
		SM-IC23-2_2	29.23	
		SM-IC23-2_3		
	3	IC23-3_1	41.59	81
		IC23-3_3		
		SM-IC23-3_2	33.64	
		SM-IC23-3_4		
4	IC23-4_1	44.10	82	
	IC23-4_2			
	SM-IC23-4_3	36.15		
	SM-IC23-4_4			
MBRF+CH_33	0	IC33-0_1	36.99	54
		IC33-0_2		
		SM-IC33-0_1	19.85	
		SM-IC33-0_2		
	1	IC33-1_1	44.79	68
		IC33-1_2		
		SM-IC33-1_1	30.42	
		SM-IC33-1_2		
	2	IC33-2_1	45.27	71
		IC33-2_2		
		SM-IC33-2_1	32.37	
		SM-IC33-2_2		
	3	IC33-3_1	45.38	72
		IC33-3_2		
		SM-IC33-3_1	32.74	
		SM-IC33-3_2		
4	IC33-4_1	45.66	82	
	IC33-4_2			
	SM-IC33-4_1	37.31		
	SM-IC33-4_2			

Figura 23: Resistencia seca a partir del ensayo de Inmersión-Compresión**Figura 24:** Resistencia húmeda a partir del ensayo de Inmersión-Compresión

Las tendencias observadas en la Figura 24 y la Figura 25, de resistencia húmeda y resistencia conservada respectivamente, son muy parecidas a las del ensayo de Tracción Indirecta, corroborando que las mezclas disminuyen su susceptibilidad al agua conforme aumenta su contenido de cemento.

Figura 25: Resistencia conservada a partir del ensayo de Inmersión-Compresión



En los diseños realizados por Auscultar Ltda. (2009), se registran resistencias secas de mezclas bituminosas recicladas en frío, muy cercanas a las que establece el parámetro de diseño de la norma con valores de resistencia a la compresión seca de 21.7 kg/cm^2 , para resistencia húmeda 18.9 kg/cm^2 y 87% para la resistencia conservada, para un contenido óptimo de emulsión asfáltica de 6%. Considerando que al adicionar pequeñas cantidades de cemento, la resistencias tiene aumentos del orden de 80%, se concluye que el uso de cemento hidráulico es benéfico para contribuir al aumento de las especificaciones de este tipo de mezcla, lo que eventualmente podría impulsar su empleo más intensamente.

Desde el punto de vista de la optimización del uso de los recursos disponibles, habría una compensación, ya que no se requeriría usar contenidos de emulsión del orden de 5.5% o 6%, si no que podrían reducirse en un 50% y este ahorro podría invertirse en la

adición de cemento a la mezcla, el cual mejora las propiedades de la misma notablemente.

En los estudios elaborados por Bateman Ingeniería (2013), se propone el diseño del material de RAP estabilizado con emulsión, obteniendo valores para la resistencia a la compresión seca de 25.1 kg/cm², resistencia húmeda de 19.4 kg/cm² y resistencia conservada de 75% para contenidos de emulsión del 5.0%; este menor valor a inmersión-compresión indica que la mezcla asfáltica estudiada tiene una menor resistencia a la compresión en comparación a lo obtenido en los ensayos efectuados.

En el trabajo de investigación de Burbano (2011), se propone el diseño de una mezcla asfáltica fabricada a partir de RAP estabilizado con emulsión, obteniendo valores para la resistencia a la compresión seca de 22.1 kg/cm², resistencia húmeda de 3.5 kg/cm² y resistencia conservada de 16%, utilizando compactación estática y para el caso de compactación dinámica la resistencia a la compresión seca fue de 20.4 kg/cm², resistencia húmeda de 13.7 kg/cm² y resistencia conservada de 67%; estos valores de resistencia indican que la mezcla asfáltica citada tiene una menor resistencia a la compresión en comparación a lo obtenido en los ensayos efectuados en esta investigación, lo que se atribuye directamente a las adiciones de cemento en la mezclas evaluadas en el presente estudio. Los valores comparados gráficamente se presentan en la Tabla 31.

Tabla 31: Valores referentes para el ensayo Inmersión-Compresión

Fuente	Resistencia seca [kg/cm ²]	Resistencia húmeda [kg/cm ²]	Resistencia conservada [%]	Tipo de mezcla
Auscultar Ltda, 2008	21.7	18.9	87	Mezcla bituminosa reciclada en frio
Bateman Ingeniería, 2013	25.1	19.4	75	Mezcla bituminosa reciclada en frio
Burbano, 2011	20.4	13.7	67	Mezcla bituminosa reciclada en frio

Los parámetros de diseños definidos la especificación IDU 450-11 establecen que la resistencia de las briquetas curadas en seco debe ser mayor o igual a 2000 kPa (20.4 kg/cm²) y que la resistencia conservada debe ser mayor o igual al 75%. De acuerdo con esto se evidencia que las resistencias alcanzadas son del orden de 80% más de la

especificada por la norma aun para las mezclas sin contenidos de cemento. Sin embargo, al igual que se observó en el ensayo de Tracción Indirecta, solo las mezclas con contenidos de cemento mayores e iguales a 2% cumplen con el parámetro de la resistencia conservada, concluyendo así que el cemento mejora la calidad de las mezclas, haciéndolas menos susceptibles al efecto del agua.

En la especificación técnica IDU GU-GE-011 se establece para la mezcla asfáltica reciclada con emulsión asfáltica, valores mínimos de la resistencia en el ensayo de Inmersión-Compresión a 14 días de 2.0 MPa (20.4 kg/cm²), y en lo que refiere a la resistencia mínima conservada establece un valor del 75%. Parámetros de aceptación idénticos se establecen en las especificaciones de construcción INVIAS 440-13 y 461-13.

De acuerdo con lo anterior se observa que la mezcla asfáltica reciclada cumple con los requerimientos mínimos de resistencia establecidos para el ensayo de Inmersión-Compresión, para los contenidos de agua y cemento estudiados (varía entre 36.99 y 45.66 kg/cm²); en lo que respecta a la resistencia mínima conservada, para la mezcla MBRF+CH_23 cumple para los contenidos de cemento del 2%, 3% y 4.0% y para mezcla MBRF+CH_33 sólo cumple para un contenido de cemento del 4%.

Comparando los resultados de los ensayos efectuados para las mezclas MBRF+CH_23 y MBRF+CH_33 se obtuvo que para esta última, la resistencia en el ensayo de Inmersión-Compresión aumenta levemente y la resistencia conservada disminuye con respecto a la mezcla MBRF+CH_23; por otro lado un mayor contenido de cemento contribuye tanto al aumento de la resistencia en el ensayo de inmersión-compresión de la mezcla como al de su resistencia conservada.

Un mayor contenido de agua y principalmente de cemento, contribuye a que la mezcla asfáltica reciclada tenga una mayor capacidad para resistir esfuerzos de compresión; este ensayo se revisa principalmente el efecto del agua sobre su resistencia y la cohesión de la mezcla asfáltica compactada.

3.4.5 Ensayo de Ahuellamiento

Luego de someter las briquetas tipo panela a la acción de la máquina con rueda cargada, se procedió a ordenar y graficar los resultados para su respectivo análisis. Es así que para la mezclas MBRF+CH_23 y MBRF+CH_33 se muestran los resultados del ensayo de Ahuellamiento total, luego de 1100 ciclos de carga en la Tabla 32. El ciclo de carga se define como cada recorrido completo de ida y vuelta de la rueda cargada sobre la superficie de la briketa tipo panela.

Tabla 32: Valores obtenidos en el ensayo de Ahuellamiento

Mezcla	Contenido de cemento [%]	Briketa	Ahuellamiento total [mm]
MBRF+CH_23	0	AH23-0	3.61
	2	AH23-2	0.60
	4	AH23-4	0.14
MBRF+CH_33	0	AH33-0	1.63
	2	AH33-2	0.56
	4	AH33-4	0.25

Así mismo, la interpretación gráfica de los resultados obtenidos en los ensayos de Ahuellamiento para las mezclas recicladas se presentan en la Figura 26 y Figura 27. En las figuras relacionadas se presenta la deformación acumulada en las briquetas tipo panela en función del número de ciclos y la deformación acumulada en función del contenido de cemento hidráulico adicionado a la mezcla, respectivamente.

Evidentemente las mezclas con contenidos de cemento presentan deformaciones plásticas significativamente menores con respecto a las mezclas sin adiciones de cemento, de lo cual se puede inferir que el cemento aporta rigidez a la mezcla y evita deformaciones plásticas a mediano y largo plazo. Esto puede ser beneficioso considerando que estas mezclas deben resistir un gran número de repeticiones de carga, lo cual se encuentra asociado a la aparición de fisuras en la superficie de la capa de rodadura a largo plazo, por exceso de deformaciones acumuladas a lo largo de su vida útil.

Por otro lado, si se tiene en cuenta una situación particular en la que el reciclado se aplique sobre una superficie que nunca ha sido objeto de tratamientos para realizar estructuras de pavimento, este mejoramiento podría presentar problemas a corto plazo,

debido a si la subrasante es un material blando, el mejoramiento tendrá exceso de deformación y se presentará agrietamientos a medida que la subrasante se deforme.

Figura 26: Gráficas de deformación en función del número de ciclos

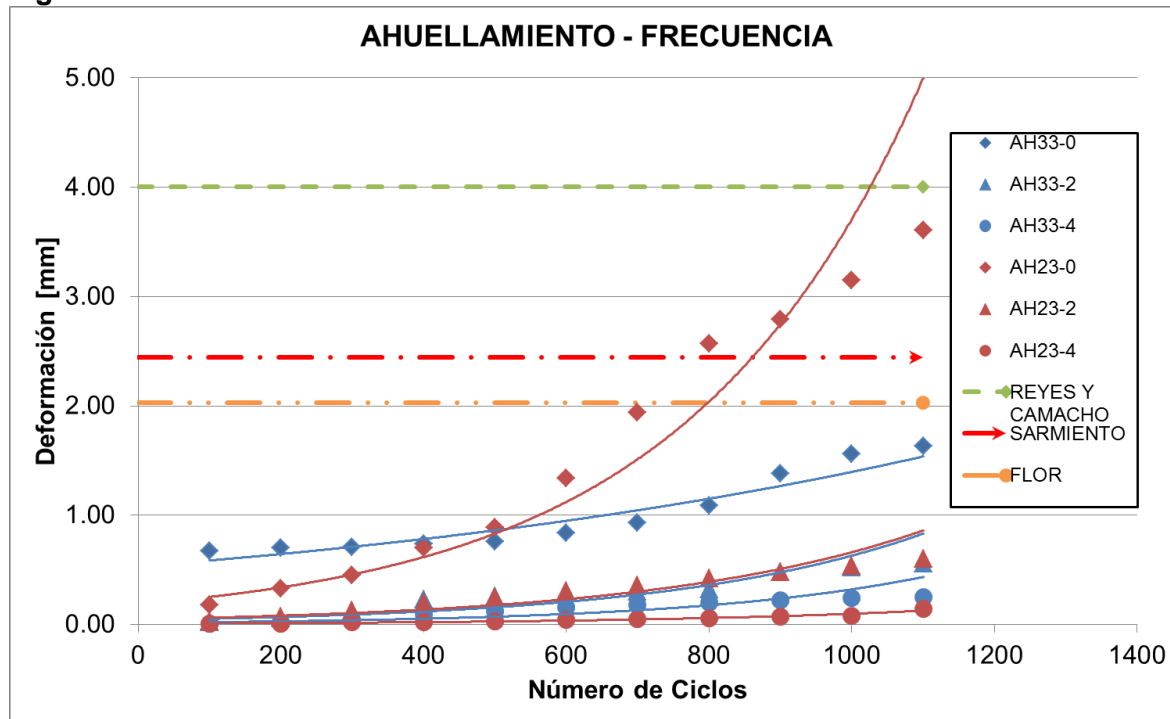
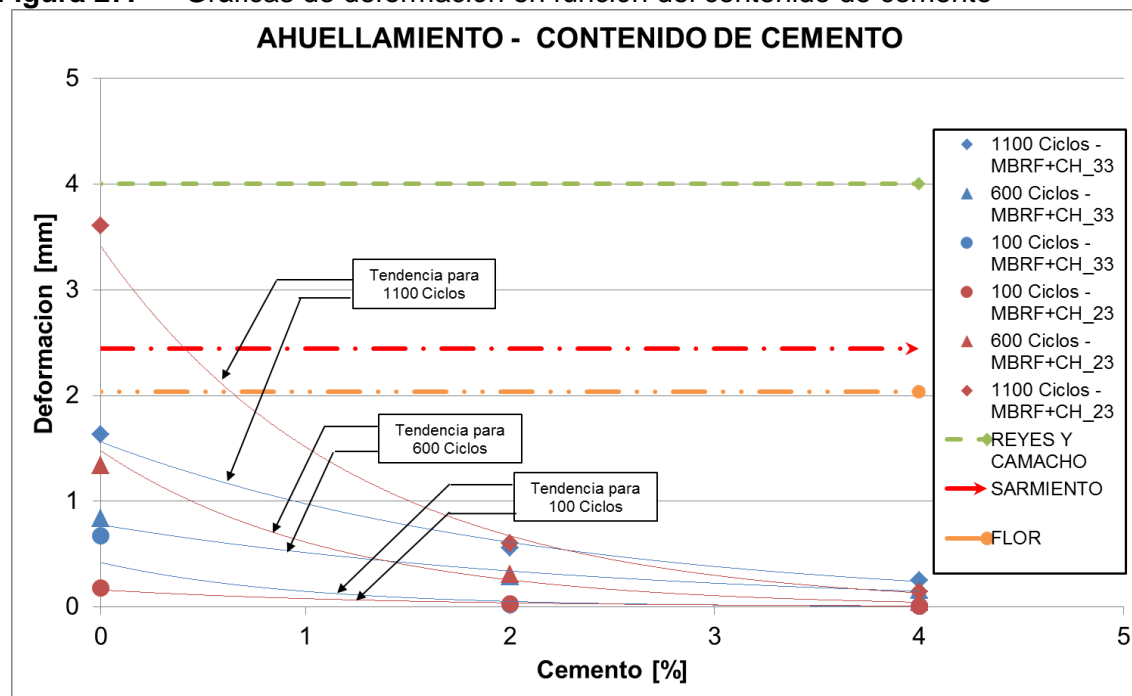


Figura 27: Gráficas de deformación en función del contenido de cemento



Es evidente que las menores deformaciones se lograron con la mezcla MBRF+CH_33 con contenidos de cemento hasta el 2%. Muy posiblemente esto se deba a que un mayor contenido de agua favorece la reacción de hidratación del cemento aportando mayor resistencia a la mezcla contra deformaciones plásticas.

Por otro lado es posible observar en la Figura 26, que el deterioro de las mezclas recicladas sin adiciones de cemento, se acelera a partir de los 600 ciclos, mientras que para las mezclas con adiciones de cemento, el deterioro presenta un comportamiento más favorable, considerando que la magnitud de la deformación es constante con el número de ciclos, lo que permite inferir una mayor durabilidad de la mezcla que contiene cemento.

Los valores de Ahuellamiento reportados por Reyes y Camacho (2008) para mezclas asfálticas calientes son del orden de 4 mm a 6 mm, mientras que Flor (2012) determina el ahuellamiento de mezclas asfálticas en caliente con valores que varían entre 2.03 y 2.55 mm. Si bien no son mezclas asfálticas en frío los valores obtenidos sirven como parámetro de comparación y permiten inferir que este tipo de mezclas poseen resistencias al corte menores asociadas a mayores deformaciones, en comparación a los resultados obtenidos en los ensayos efectuados en esta investigación.

Por otro lado los valores de ahuellamiento obtenidos por Sarmiento (2013), para mezclas asfálticas frías, luego de 43 días de curado pueden ser hasta de 2.44 mm, mientras que para mezclas con 15 días de curado pueden ser de 4.11 mm. Esto corrobora lo observado en la sección 3.4.3, con respecto al aporte de resistencia a corto plazo que implica la adición de cemento a la mezcla, considerando que las deformaciones presentadas para la mezcla estudiada en esta investigación se obtuvieron luego de permitir un tiempo de 7 días de curado.

En comparación con los valores obtenidos en esta investigación, se observa que el aporte del cemento en la disminución de deformaciones plásticas es del orden del 50% con respecto a lo presentado por los autores que se relacionan en la Tabla 33.

En lo que respecta a las especificaciones técnicas de construcción, no existen requerimientos mínimos en cuanto a valores máximos de deformación se refiere. Este

ensayo busca establecer las deformaciones de la mezcla asfáltica luego de compactarla y someterla al paso de una rueda cargada.

Tabla 33: Valores comparados en el ensayo de Ahuellamiento

Fuente	Ahuellamiento [mm]	Tipo de mezcla
Reyes y Camacho, 2008	4.00	Mezcla densa en caliente con agregado virgen
Flor, 2012	2.03	Mezcla densa en caliente con agregado de concreto reciclado
Sarmiento, 2013	2.44	Mezcla densa en frío con agregados vírgenes

Con relación a los ensayos efectuados se encontró que para la mezcla MBRF+CH_33 las deformaciones son menores con respecto a la mezcla MBRF+CH_23 (pasa de 3.61 a 1.63 mm para un contenido nulo de cemento y 1100 ciclos de carga). Por otro lado un mayor contenido de cemento contribuye a disminuir las deformaciones de la mezcla, que para un mayor número de ciclos resulta ser mayor en todos los casos. Para la mezcla MBRF+CH_23 el valor de la deformación para 1100 ciclos de carga aumentando el contenido de cemento pasa de 3.61 a 0.14 mm, mientras que para la mezcla MBRF+CH_33 pasa de 1.63 a 0.25 mm.

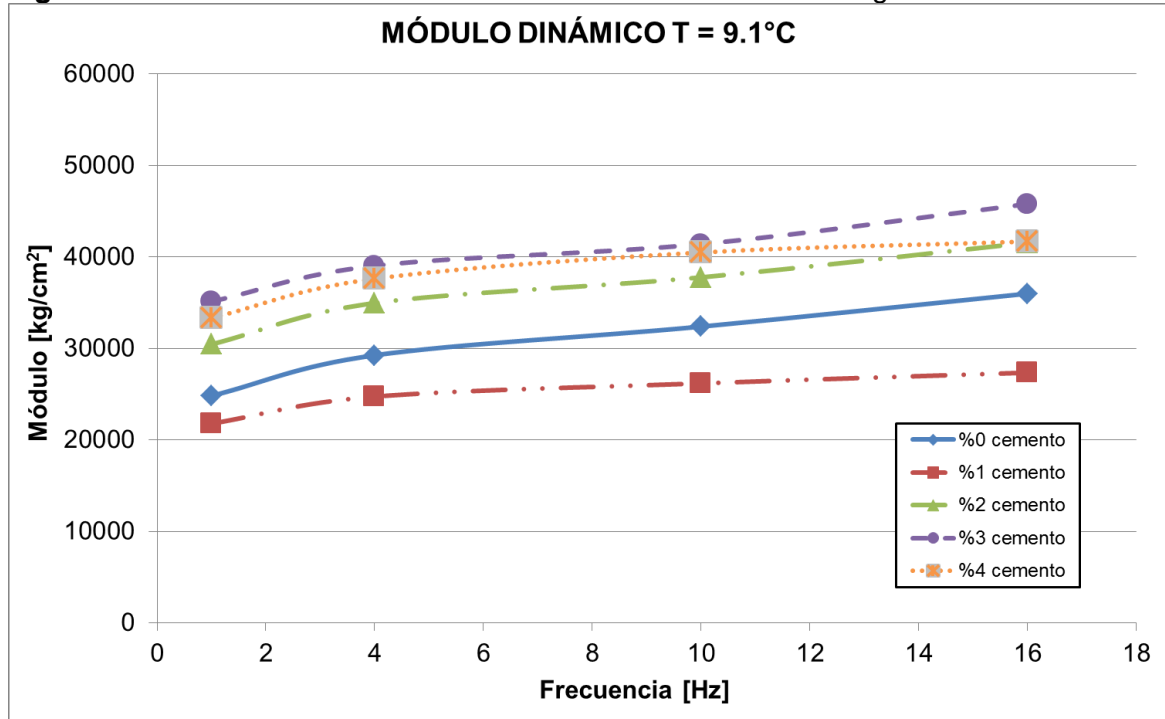
Un mayor contenido de agua y principalmente de cemento, contribuye a que la mezcla asfáltica reciclada tenga mayores resistencias al corte y por ende menores deformaciones por ahuellamiento, que son las patologías asociadas a la acumulación gradual de deformaciones permanentes en las zonas de canalización del tránsito, producto de la densificación de la mezcla asfáltica (disminución del volumen y por ende aumento de la densidad) y de las deformaciones repetitivas por baja resistencias al corte (principal causa de ahuellamiento en los pavimentos correctamente construidos).

3.4.6 Ensayo de Módulo Dinámico

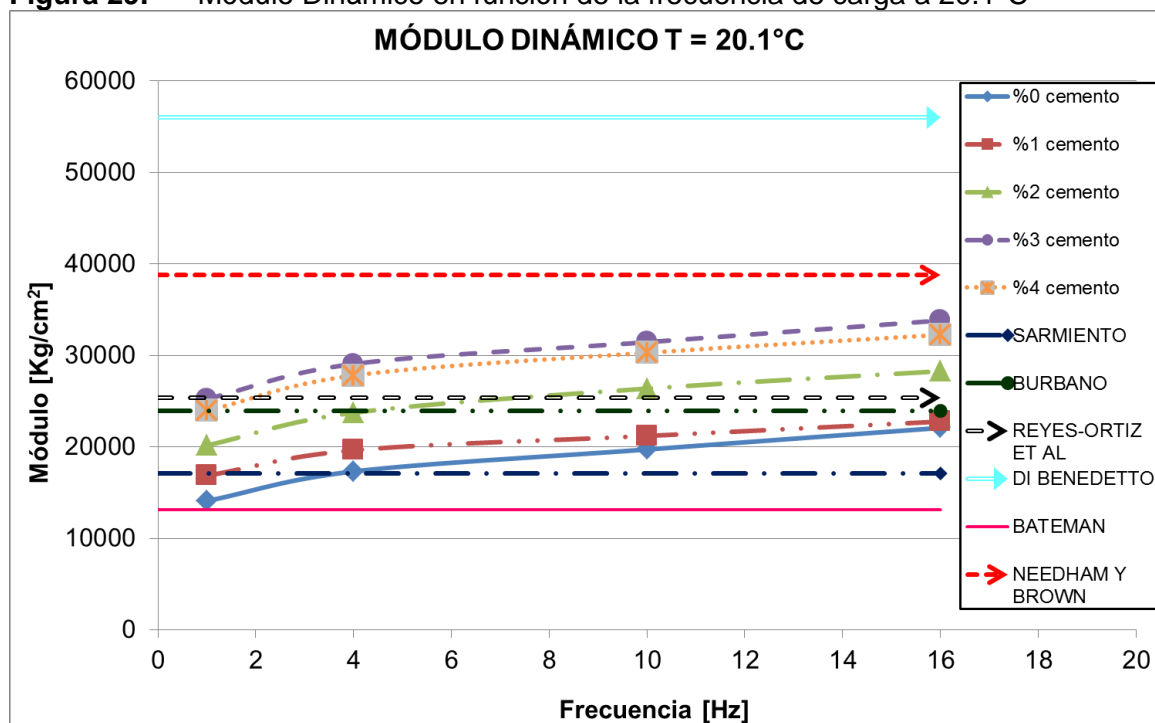
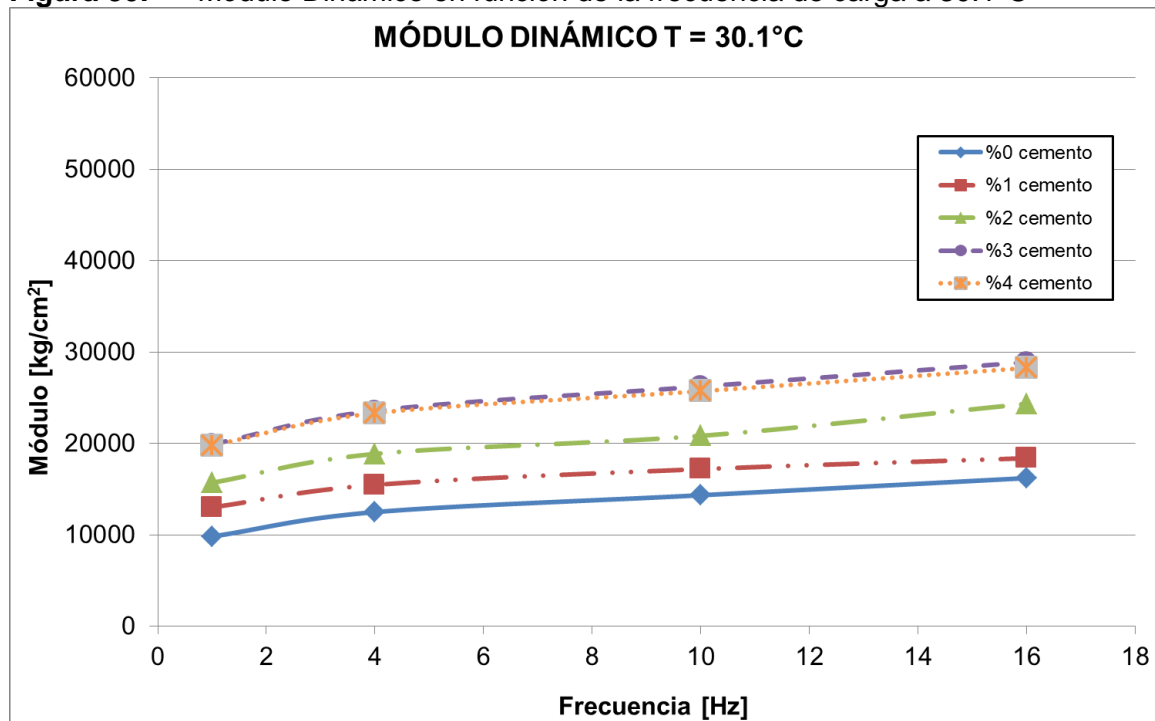
En consideración a que el comportamiento mecánico más deseable en la mezcla bituminosa reciclada en frío, de acuerdo a lo observado en las secciones anteriores de este capítulo, fue la obtenida con la mezcla MBRF+CH_33, se fabricaron 5 briquetas con los contenidos de cemento estudiados en esta investigación, para establecer el comportamiento mecánico representativo de la mezcla cuando se somete a cargas cíclicas a varias temperaturas, mediante el ensayo de módulo dinámico.

Tabla 34: Valores obtenidos en el ensayo de Módulo Dinámico

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Módulo Dinámico Promedio [kg/cm ²]				
		0% Cemento	1% Cemento	2% Cemento	3% Cemento	4% Cemento
9.1	1	24826	21789	30454	35134	33345
	4	29255	24736	34965	39038	37623
	10	32392	26188	37776	41412	40492
	16	35994	27355	41550	45792	41688
20.1	1	14095	16859	20167	25252	23962
	4	17318	19637	23737	29071	27812
	10	19724	21203	26381	31459	30298
	16	22085	22776	28280	33825	32258
30.1	1	9823	13014	15704	19910	19795
	4	12494	15468	18860	23580	23322
	10	14337	17194	20832	26235	25719
	16	16212	18385	24348	28894	28262

Figura 28: Módulo Dinámico en función de la frecuencia de carga a 9.1 °C

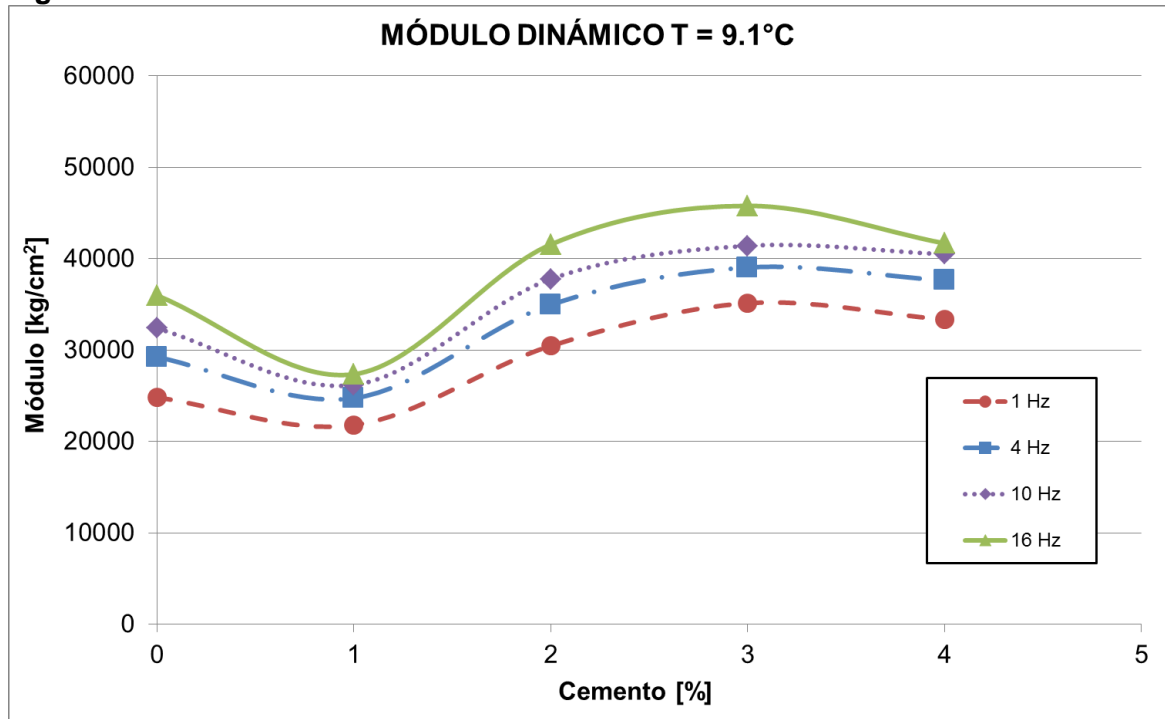
La interpretación gráfica de los resultados obtenidos en los ensayos de Módulo Dinámico en función de la frecuencia, para la mezcla MBRF+CH_33 se presentan en la Figura 28, la Figura 29 y la Figura 30 para las temperaturas de 9.1°C, 20.1°C y 30.1°C, respectivamente.

Figura 29: Módulo Dinámico en función de la frecuencia de carga a 20.1°C**Figura 30:** Módulo Dinámico en función de la frecuencia de carga a 30.1°C

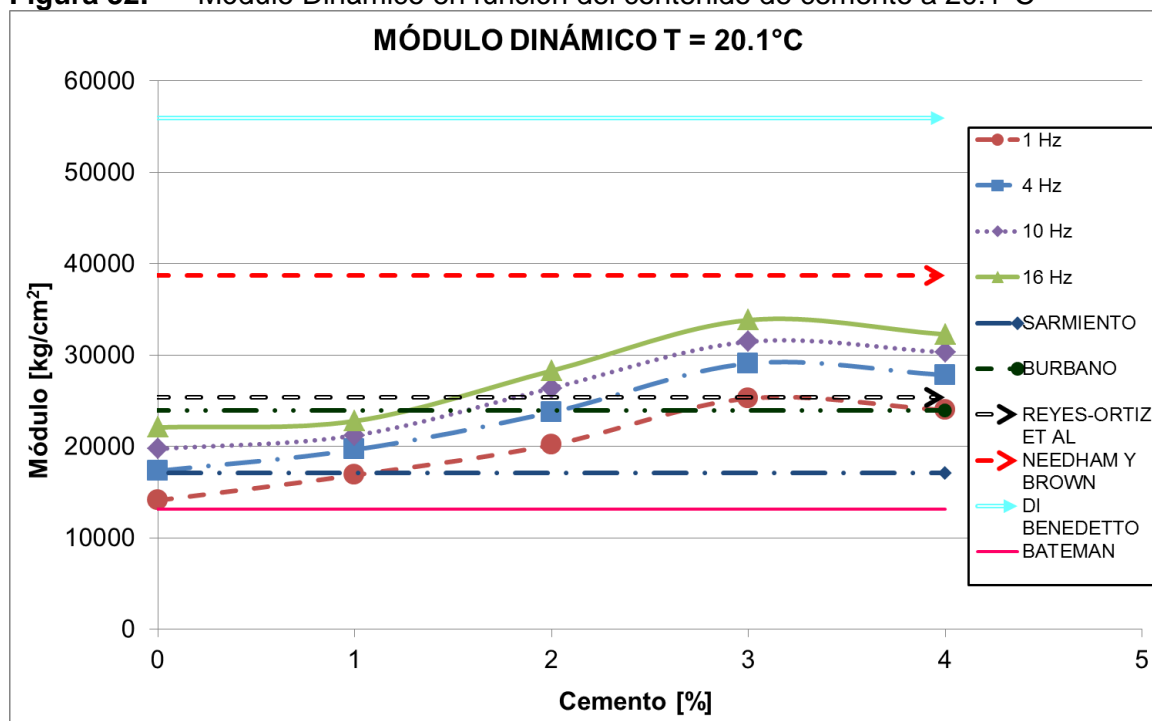
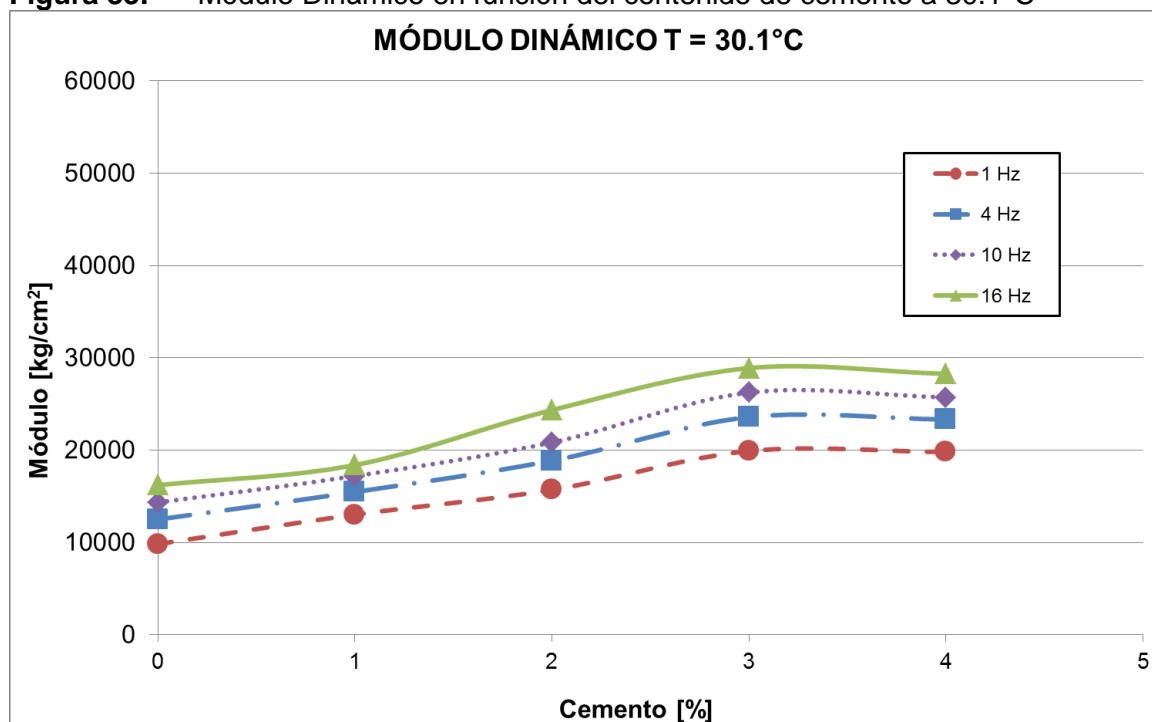
Respecto a los ensayos efectuados se obtuvo que para un mayor contenido de cemento, el valor del Módulo Dinámico aumenta (pasa de 17318 a 27812 kg/cm^2 para una frecuencia de carga de 4.0 Hz y una temperatura de 20.1°C); sin embargo se destaca el hecho que el mayor valor de módulo dinámico se presenta para un contenido de cemento del 3.0% y no del 4.0%, como era de esperarse.

Adicionalmente se presenta otra interpretación gráfica de los resultados obtenidos en los ensayos de Módulo Dinámico del contenido de cemento, para la mezcla MBRF+CH_33 en la Figura 31, la Figura 32 y la Figura 33 para las temperaturas de 9.1°C, 20.1°C y 30.1°C, respectivamente.

Figura 31: Módulo Dinámico en función del contenido de cemento a 9.1 °C



En la Figura 32 al igual que en la Figura 29, se comparan los valores de módulo dinámico reportados por otros autores en investigaciones afines al presente estudio, debido a que en la mayoría de estas investigaciones se emplea la temperatura aproximada de 20 °C y las frecuencias de carga relacionadas en la Tabla 35. Adicionalmente se aclara que las mezclas involucradas en las investigaciones mencionadas, no necesariamente son del mismo tipo que la mezcla objeto del presente estudio, pero se consideró que dichos valores son representativos como referentes.

Figura 32: Módulo Dinámico en función del contenido de cemento a 20.1°C**Figura 33:** Módulo Dinámico en función del contenido de cemento a 30.1°C

En la investigación de Sarmiento (2013), se determina el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en frío fabricadas con un contenido de emulsión del 6.1% y un

contenido de agua del 4.0%, el resultado del ensayo de Módulo Dinámico para una frecuencia de carga de 4.0 Hz y una temperatura de ensayo de 21°C fue 17115 kg/cm²; este valor resulta ser menor a los resultados obtenidos en los ensayos efectuados en el presente estudio, lo que indica resistencias menores y mayores deformaciones. Aunque es importante resaltar que los valores de módulo comparados se obtuvieron de briquetas con relación altura-diámetro de 1H:1D.

Por otro lado Burbano (2011), propone el diseño del material de RAP estabilizado con emulsión en contenidos que varían entre 3.8 y 5.5%, los resultados de los ensayos de módulo dinámico para una frecuencia de carga de 4.0 Hz y una temperatura de ensayo de 20°C variaron entre 12750 y 23970 kg/cm²; estos valores resultan ser a los obtenidos en los ensayos efectuados, lo que indica resistencias menores y mayores deformaciones.

Así mismo Reyes-Ortiz et.al., (2012), estudia el comportamiento de mezclas asfálticas frías con granulometrías colombianas, en lo que respecta a granulometrías tipo INVÍAS se obtuvieron mayores valores de módulo para los casos en que se adicionó cemento, obteniendo valores para 5 Hz de frecuencia en estado seco que variaban entre 18500 y 25500 kg/cm², para el caso del estado húmedo los valores aumentaron significativamente variando entre 35700 y 40800 kg/cm²; en cuanto a las granulometrías tipo IDU también se obtuvieron mayores valores de módulo para los casos en que se adicionó cemento, obteniendo valores para 5 Hz de frecuencia en estado seco que variaban entre 15300 y 18400 kg/cm², para el caso del estado húmedo los valores aumentaron significativamente variando entre 17300 y 35700 kg/cm². Estos mayores valores en estado húmedo con respecto a los resultados de los ensayos efectuados, indican resistencias mayores y menores deformaciones asociadas a la reacción del cemento en la mezcla asfáltica.

En lo que concierne a Needham y Brown (2000), proponen el diseño de mezclas asfálticas en frío con agregados vírgenes, adición de cemento en contenidos que varían entre 1.0 y 4.0%, contenidos de agua entre 2.5 y 4.0 % y un contenido de emulsión del 4.7%; los resultados de los ensayos de módulo para una temperatura de ensayo de 20°C, diferentes períodos de curado y contenidos de cemento variaron entre 4600 y 125000 kg/cm², específicamente para el mayor contenido de cemento ensayado (4.0%) y el mayor tiempo de curado (600 días) los valores obtenidos variaron entre 38750 y 125000 kg/cm²; estos últimos valores resultan ser bastante superiores a los obtenidos en

los ensayos efectuados lo que indica resistencias mayores y menores deformaciones que se logran con mayores tiempos de curado de la mezcla asfáltica.

Di Benedetto et al. (2004), propone en su trabajo de investigación el diseño de mezclas asfálticas con diferentes tipos de asfalto. El resultado del ensayo de Módulo Dinámico para una frecuencia de carga de 10 Hz y una temperatura de ensayo de 20°C, variaron entre 17300 y 56000 kg/cm²; estos valores resultan ser mayores a lo obtenido en los ensayos efectuados lo que indica resistencias mayores y menores deformaciones, aunque se destaca el hecho que la frecuencia de referencia del ensayo es mayor a la que se está considerando de comparación para los ensayos efectuados.

En los estudios elaborados por Bateman Ingeniería (2013), se propone el diseño del material de RAP estabilizado con emulsión asfáltica en un contenido del 5.5%, obteniendo valores para el módulo dinámico de 13140 kg/cm² con una frecuencia de carga de 4.0 Hz y una temperatura de ensayo de 25°C; este valor es un poco menor a los obtenidos en los ensayos efectuados lo que indica resistencias menores y mayores deformaciones aunque debe considerarse la mayor temperatura a la que se efectúa el ensayo.

Tabla 35: Valores de referencia para el ensayo de Módulo Dinámico

Fuente	Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Módulo Dinámico [kg/cm ²]	Tipo de mezcla
Sarmiento, 2013	21	4	17115	Mezcla densa en frio con agregado virgen
Burbano, 2011	20	4	23970	Mezcla bituminosa reciclada en frio
Reyes-Ortiz et al., 2012	20	5	25400	Mezcla densa en frio con agregado virgen
Needham y Brown, 2000	20	4	38750	Mezcla densa en frio con agregado virgen y con adición de cemento
Di Benedetto et al., 2004	20	10	56000	Mezcla densa en caliente con agregado virgen
Bateman Ingeniería, 2013	25	4	13140	Mezcla bituminosa reciclada en frio
Investigación 0% Cemento	20.1	4	17318	Mezcla bituminosa reciclada en frio con adición de cemento
Investigación 1% Cemento	20.1	4	19637	
Investigación 2% Cemento	20.1	4	23737	
Investigación 3% Cemento	20.1	4	25252	
Investigación 4% Cemento	20.1	4	30298	

Un mayor contenido de cemento garantiza mayores valores de módulo dinámico, el cual disminuye con la temperatura de ensayo y aumenta con la frecuencia de carga que se asocia a las velocidades de operación del tránsito. Una mayor resistencia con menores deformaciones, lo cual se logra al tener menores tiempos de aplicación de la carga y mayores frecuencias, se asocia con mayores valores del módulo dinámico.

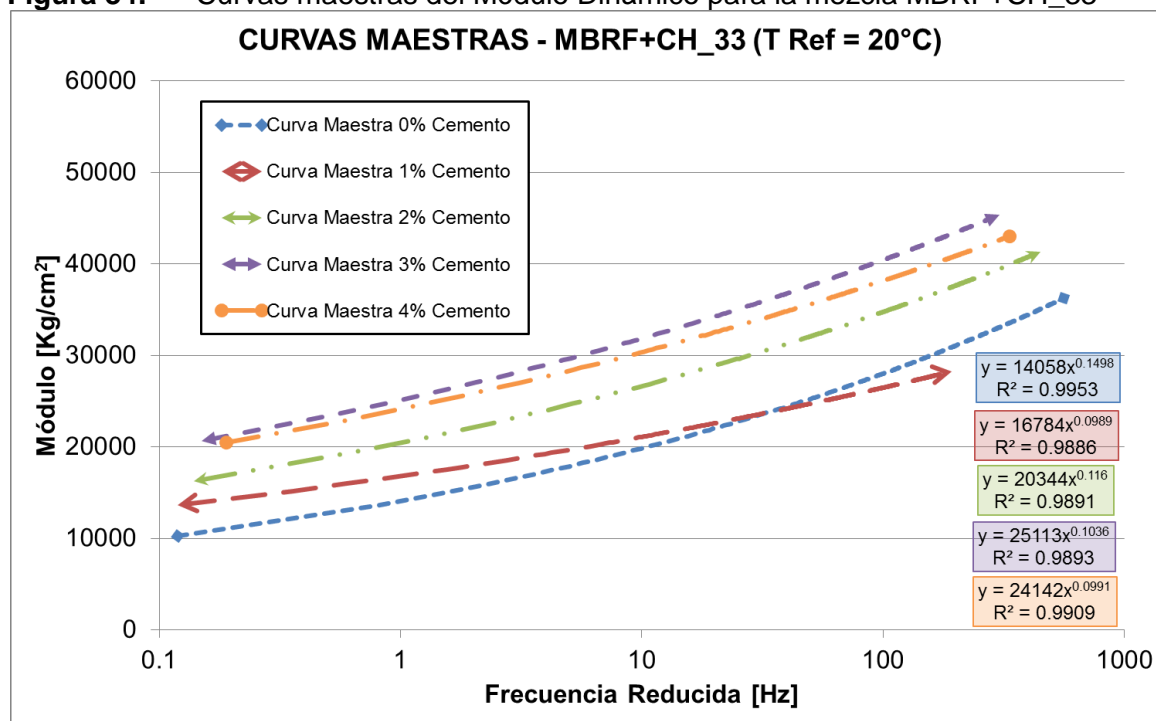
Los valores de Módulo Dinámico empleados como referentes en la interpretación gráfica se presentan en la Tabla 35. En lo que respecta a las especificaciones técnicas de construcción, no se presentan requerimientos mínimos en cuanto a valores del Módulo Dinámico se refiere.

▪ **Curvas maestras del módulo dinámico**

El ensayo de Módulo Dinámico busca establecer la relación entre los esfuerzos y deformaciones de la mezcla asfáltica, lo cual define las propiedades mecánicas del material para diferentes condiciones de temperatura y frecuencias de carga. Para el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos practicados a las 5 briquetas de la mezcla MBRF+CH_33, se dispuso construir la curva maestra del Módulo Dinámico para cada briketa con distinta adición de cemento, con lo se dará un mayor alcance al análisis de los datos obtenidos en los ensayos.

La metodología empleada para la obtención de las curvas maestras del módulo dinámico, así como el procedimiento utilizado para construir la curva maestra con los resultados obtenidos para la mezcla MBRF+CH_33 con 4% de cemento portland se presentan en el Anexo C.

En la Figura 34 se muestran las curvas maestras para la mezcla con los contenidos de cemento de 0, 1, 2, 3 y 4. De acuerdo a lo descrito en el Anexo C, estas curvas maestras se ajustaron con una ecuación de regresión de forma exponencial, teniendo en cuenta que los valores de R^2 son muy cercanos a 1 para este tipo de ajuste.

Figura 34: Curvas maestras del Módulo Dinámico para la mezcla MBRF+CH_33

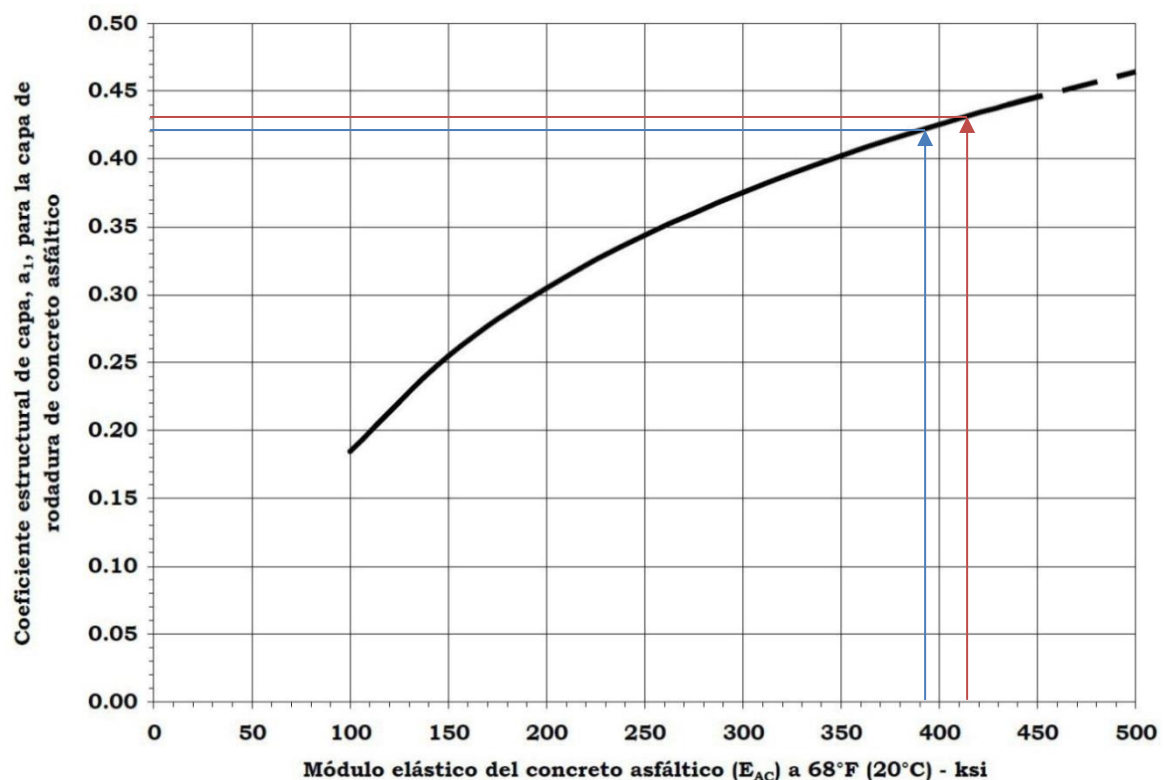
Según Loria- Salazar (2010), el módulo dinámico resulta ser de bastante importancia en el diseño de estructuras de pavimentos, los nuevos software de diseño como el de la guía MEPDG (AASHTO 2002), el KENPAVE (Yanhg-Huan), el 3D-move (Siddharthan, UNR) y el viscoroute (LPCP, Francia) son ejemplos de software que consideran el módulo dinámico como parámetro fundamental de entrada en sus procedimientos de diseño.

De acuerdo con Vásquez (2002), en Colombia actualmente se hace uso del Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos del INVÍAS, el cual está basado en el método de diseño AASHTO 93; este método de diseño establece valores del coeficiente de aporte estructural para las distintas capas que conforman la estructura de pavimento, este parámetro expresa la capacidad relativa del material para actuar como componente estructural del pavimento y puede ser estimado a través de una serie de ecuaciones o ábacos, que correlacionan las diferentes propiedades físicas y mecánicas de los materiales, para el caso específico de mezclas asfálticas el coeficiente de aporte estructural puede ser estimado a partir de los resultados de módulo elástico, el cual se determina bajo condiciones de velocidad de carga constante y con el monitoreo de la deflexión, luego se procede a determinar la deformación.

Este coeficiente utilizado por el método de diseño AASHTO 93 asigna a cada capa del pavimento un coeficiente (a_i), el cual es requerido para el diseño normal de la estructura de pavimento flexible. Estos coeficientes permiten convertir los espesores reales del pavimento a números estructurales (SN_i), donde cada coeficiente es una medida de la capacidad relativa de cada material para funcionar como parte de la estructura del pavimento.

La siguiente figura presenta la gráfica de las ecuaciones formuladas por Per Ullidtz en 1987, donde se relacionan valores del módulo elástico con coeficientes de aporte estructural, estos coeficientes permiten establecer resultados del número estructural, el cual representa el aporte que hace la capa de material a la estructura de pavimento.

Figura 35: Módulo Dinámico en función del coeficiente de aporte estructural (a_i)



Fuente: Vásquez (2002)

Para fines prácticos y teniendo en cuenta que en Colombia el método AASHTO 93 sigue vigente, se hace uso de la anterior figura tomando como parámetros de entrada los valores de módulo dinámico obtenidos de los ensayos efectuados para la temperatura de

20.1°C, una frecuencia de carga de 4.0 Hz y los contenidos de cemento que presentan un mejor comportamiento, asociado a los mayores módulos para las condiciones descritas como 4% y 3% (29071 y 27812 kg/cm² que equivalen a 395580 y 413487 psi, respectivamente), se estiman valores del coeficiente de aporte estructural que varían entre 0.42 y 0.43. Estos coeficientes indican la gran capacidad de soporte que el material puede llegar a ofrecer a la estructura de pavimento que se proyecte utilizando el material de reciclado estabilizado con emulsión asfáltica y cemento.

Si bien es acertado afirmar que los coeficientes de aporte estructural son relativamente altos, ya que para Bogotá se utilizan coeficientes de 0.39 para carpetas asfálticas, es importante resaltar que los valores de módulo dinámico son también altos debido al aporte de la resistencia del cemento, ya que se permitió un curado de las muestras de 2 meses.

3.5 Análisis integral de los resultados obtenidos en la caracterización mecánica de la mezcla bituminosa reciclada en frío con cemento hidráulico (MBRF+CH)

En esta sección se presentan de manera resumida, los resultados de los ensayos de caracterización mecánica de la mezcla, con el objetivo de establecer el comportamiento mecánico más favorable respecto a los parámetros y criterios resaltados en la sección 3.4. Lo anterior está orientado a recomendar el uso de la mezcla con los contenidos óptimos de agua y cemento, explicando los criterios que se tuvieron en cuenta para generar dicha recomendación.

La Tabla 36 resume los valores de resistencia y deformación obtenidos en todos los ensayos de caracterización mecánica practicados en la mezcla MBRF+CH_23, entre los cuales se resaltan los obtenidos en el ensayo Marshall, para la estabilidad (3004 kg) con un contenido de 4% de cemento y el flujo sin contenido de cemento (4.19 mm).

Por otro lado con respecto al ensayo de Tracción Indirecta se observa que los valores más altos de resistencia se obtuvieron para los contenidos de cemento de 0% y 4% con 4.43 kg/cm² y 4.35 kg/cm² respectivamente, sin embargo se cumple el parámetro de aceptación para la resistencia conservada (>75%) establecido en la especificación

técnica IDU GU-GE-011 para los contenidos de cemento de 3% y 4%, el cual más exigente que el parámetro de aceptación de la IDU 450-05 donde se dispone que la resistencia conservada debe ser mayor o igual al 50%.

De otra parte en el ensayo de Inmersión-Compresión se notó que las resistencias más altas se dieron con los contenidos de cemento de 2%, 3% y 4%, así mismo, con estas adiciones de cemento se dio cumplimiento al parámetro de aceptación de las especificaciones técnicas IDU 450-11 e IDU GU-GE-011, que establece una resistencia conservada mínima en el ensayo de Inmersión-Compresión del 75%, al igual que las especificaciones de construcción INVIAS 440-13 y 461-13.

Finalmente en el ensayo de ahuellamiento se observa que la menor deformación permanente se encuentra asociada a una adición de 4% de cemento en la mezcla.

Tabla 36: Valores obtenidos en la caracterización mecánica de la mezcla MBRF+CH_23

Ensayo		Unidades	Contenido de Cemento [%]				
			0	1	2	3	4
Marshall	Estabilidad	[kg]	1874	1991	2520	2157	3004
	Flujo	[mm]	4.19	4.95	4.95	4.95	4.95
Tracción Indirecta	Resistencia Seca	[kg/cm ²]	4.43	4.06	4.07	3.78	4.35
	Resistencia Húmeda	[kg/cm ²]	1.30	1.94	2.83	3.12	3.89
	Resistencia conservada	[%]	29	48	70	83	90
Inmersión – Compresión	Resistencia Seca	[kg/cm ²]	37.73	37.47	38.25	41.59	44.10
	Resistencia Húmeda	[kg/cm ²]	19.69	23.03	29.23	33.64	36.15
	Resistencia conservada	[%]	52	61	76	81	82
Ahuellamiento		[mm]	3.61	-	0.60	-	0.14

La Tabla 37 resume los valores de resistencia y deformación obtenidos en todos los ensayos de caracterización mecánica practicados en la mezcla MBRF+CH_33, entre los cuales se resaltan los obtenidos en el ensayo Marshall, para la estabilidad (3346 kg) con un contenido de 4% de cemento, así mismo el flujo de 4.06 mm y 4.19 mm para contenidos de cemento de 0% y 3%, respectivamente.

En el ensayo de Tracción Indirecta se observa que los valores más altos de resistencia se obtuvieron para los contenidos de cemento de 2% y 3% con 4.36 kg/cm² y 5.11 kg/cm² respectivamente, sin embargo se cumple el parámetro de aceptación para la resistencia conservada (>75%) establecido en la especificaciones técnicas IDU 450-11 e IDU GU-GE-011 únicamente para el contenido de cemento de 4%.

De otra parte en el ensayo de Inmersión-Compresión se notó que las resistencias más altas se dieron con los contenidos de cemento de 2%, 3% y 4%, pero solo con la adición de 4% de cemento se dio cumplimiento al parámetro de aceptación de la especificación técnica IDU GU-GE-011, que establece una resistencia conservada mínima del 75%.

Finalmente considerando el ensayo de ahuellamiento se observa que la menor deformación permanente se encuentra asociada a una adición de 4% de cemento en la mezcla.

Tabla 37: Valores obtenidos en la caracterización mecánica de la mezcla MBRF+CH_33

Ensayo			Unidades	Contenido de Cemento [%]				
				0	1	2	3	4
Marshall (Estabilidad y Flujo)	Estabilidad		[kg]	1294	2377	2689	2864	3346
	Flujo		[mm]	4.06	4.70	4.45	4.19	4.83
Tracción Indirecta	Resistencia Seca		[kg/cm ²]	3.79	3.84	4.36	5.11	4.21
	Resistencia Húmeda		[kg/cm ²]	1.04	2.26	2.94	3.26	3.68
	Resistencia conservada		[%]	27	59	67	64	87
Inmersión – Compresión	Resistencia Seca		[kg/cm ²]	36.99	44.79	45.27	45.38	45.66
	Resistencia Húmeda		[kg/cm ²]	19.85	30.42	32.37	32.74	37.31
	Resistencia conservada		[%]	54	68	71	72	82
Ahuellamiento			[mm]	1.63		0.56		0.25
Módulo Dinámico 9.1 [°C]	Frec. [Hz]	1	[kg/cm ²]	24826	21789	30454	35134	33345
		4		29255	24736	34965	39038	37623
		10		32392	26188	37776	41412	40492
		16		35994	27355	41550	45792	41688
Módulo Dinámico	Frec. [Hz]	1	[kg/cm ²]	14095	16859	20167	25252	23962
		4		17318	19637	23737	29071	27812
		10		19724	21203	26381	31459	30298

Ensayo			Unidades	Contenido de Cemento [%]				
				0	1	2	3	4
20.1 [°C]		16		22085	22776	28280	33825	32258
Módulo Dinámico	Frec. [Hz]	1	[kg/cm²]	9823	13014	15704	19910	19795
		4		12494	15468	18860	23580	23322
		10		14337	17194	20832	26235	25719
30.1 [°C]		16		16212	18385	24348	28894	28262

Luego de analizar los resultados presentados en la Tabla 36 y la Tabla 37, se puede afirmar que los dos tipos de mezclas que involucran contenidos de agua distintos, atienden los requerimientos establecidos en la normatividad utilizada como punto de comparación, bajo las condiciones de adición de cemento especificadas anteriormente.

Sin perjuicio de lo anterior, cabe resaltar que en términos de órdenes de magnitud, para la mezcla MBRF+CH_33 se obtuvieron valores más altos de resistencia en los ensayos de carga estática que para la mezcla MBRF+CH_23, así mismo, en el ensayo Marshall se evidenció un menor valor de flujo para la mezcla MBRF+CH_33 que para la mezcla MBRF+CH_23 cercano a 4.00 mm, el cual es un parámetro de aceptación muy importante para las mezclas asfálticas, en consideración a que los valores altos de flujo están asociados a la aparición de grietas y deformaciones prematuras en las capas de rodadura o carpeta asfáltica.

De otra parte en el ensayo de ahuellamiento se obtuvieron valores de deformación muy parecidos para los dos tipos de mezcla con adición de 4% de cemento, sin embargo, se consideró más conveniente un valor de 0.25 mm para la mezcla MBRF+CH_33, que el valor de 0.14 mm para la mezcla MBRF+CH_23, en consideración a que una mezcla más rígida permitirá una menor deformación plástica y por ende tendrá un proceso de fatiga más acelerado, que a su vez se traduce en una menor vida útil de la mezcla. Por tal motivo durante el desarrollo de la campaña experimental se optó por elaborar los ensayos de módulo dinámico sobre la mezcla MBRF+CH_33, con el objetivo de conocer la respuesta mecánica de la misma a la aplicación de cargas dinámicas a distintas frecuencias y diferentes temperaturas, de lo cual se observa que los valores más altos de módulo se obtuvieron para las adiciones de 3% y 4% de cemento.

Tabla 38: Valores de resistencia para la mezcla MBRF+CH_33 con 4% de Cemento

Ensayo		Valor	IDU 510-11	Cumple	IDU GU-GE-011	Cumple	IDU 450-05/11	Cumple	INVIAS 440-13 INVIAS 461-13	Cumple
Marshall (Estabilidad y Flujo)	Estabilidad [kg]	3346	>600 (T. Liviano) >750 (T. Medio) >900 (T. Pesado)	SI	-	-	-	-	-	-
	Flujo [mm]	4.83	<4.0 (T. Liviano) <3.5 (T. Medio) <2.0 (T. Pesado)	NO	-	-	-	-	-	-
Tracción Indirecta	Resistencia Seca [kg/cm ²]	4.21	-	-	>2.54	SI	>2.54	SI	-	-
	Resistencia conservada [%]	87	-	-	>75	SI	>50	SI	-	-
Inmersión-Compresión	Resistencia Seca [kg/cm ²]	45.66	-	-	>20.4	SI	>20.4	SI	>25.5	SI
	Resistencia húmeda [kg/cm ²]	37.31	-	-	-	-	-	-	>20.4	SI
	Resistencia conservada [%]	82	-	-	>75	SI	>75	SI	>75	SI

Teniendo en cuenta los análisis presentados anteriormente, se tomó la decisión de adoptar la mezcla MBRF+CH_33 con 4% de adición de cemento, para recomendar su empleo en proyectos viales de la ciudad de Bogotá o ciudades con condiciones climáticas parecidas. La Tabla 38 muestra el contraste entre los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización mecánica de la mezcla y los parámetros de aceptación establecidos en la normatividad utilizada para efectos de comparación.

Cabe anotar que el parámetro de flujo establecido en la especificación IDU 510-11, es un criterio de aceptación para mezclas asfálticas en caliente y aunque no se cumple por parte de la mezcla estudiada en esta investigación se considera que tiene una buena aproximación a dicho parámetro. Lo anterior permite inferir que la mezcla MBRF+CH_33 con 4% de cemento puede equipararse en términos de resistencia mecánica y resistencia a la deformación a las mezclas asfálticas en caliente, pero con todos los beneficios

ambientales y energéticos asociados al tipo de mezcla, sus técnicas de construcción y así mismo resaltando que esta mezcla se conforma a partir de materiales de desecho.

Finalmente es pertinente aclarar que la aplicación de la mezcla MBRF+CH con 4% de cemento portland, debe restringirse en función de las características ambientales y de tráfico asociadas al sitio de construcción. Esto es temperaturas entre 9°C y 20°C, que son temperaturas típicas de la ciudad de Bogotá, así mismo para el tráfico se recomienda el uso de la mezcla reciclada como capa de base y rodadura asfáltica, para proyectos cuyo tránsito no supere 0.5×10^6 ejes equivalentes de 80 kN (tránsitos bajos: tipo T1 INVÍAS 100-13, o tipo T0 a T1 IDU 107-11). Para tráficos más altos, el diseñador deberá realizar consideraciones especiales bajo su criterio, ya que la mezcla presenta un valor de flujo por encima de 4.0 o 3.5 mm, que es lo establecido en la especificación técnica IDU 510-11, lo cual puede redundar en ahuellamientos y deformaciones prematuras importantes.

Por otro lado es importante considerar la aplicación de un tratamiento superficial o de sello, como los que se especifican en la normatividad relacionada en este estudio, con el objetivo de aportar durabilidad a la mezcla y resistencia a los efectos nocivos del agua sobre la mezcla, lo cual lo hace imprescindible en la construcción de estructuras de pavimento con la mezcla recomendada.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- En esta investigación se elaboraron los ensayos pertinentes para realizar la caracterización granulométrica del RAP empleado en la fabricación de mezclas asfálticas recicladas en frío.
- Así mismo, se realizaron los ensayos básicos de caracterización sobre el asfalto envejecido, obtenido a partir de la recuperación del asfalto del RAP mediante el uso del equipo de rotavapor.
- Se realizaron ensayos en la mezcla bituminosa reciclada con cemento, las dosificaciones utilizadas fueron de 0%, 1%, 2%, 3% y 4%. Se evaluaron parámetros de resistencia mecánica tales como Estabilidad y Flujo, Tracción Indirecta, Inmersión – Compresión, Ahuellamiento y Módulo Dinámico, para así determinar el mejor desempeño de la mezcla propuesta.
- De acuerdo a los resultados de la caracterización mecánica para la mezcla bituminosa reciclada en frío con cemento hidráulico, se presentan los mejores resultados en cuanto a resistencia y comportamiento mecánico para la mezcla MBRF+CH_33 con un contenido de cemento del 4.0%. Lo anterior considerando que para el ensayo Marshall se obtuvo el mejor valor de estabilidad 3346 kg con un valor de flujo de 4.83 mm.
- Por otro lado en el ensayo de Tracción Indirecta, se evidenció que el mejor valor de resistencia se presentaba para un contenido de cemento de 3.0% de cemento (5.11 kg/cm^2), ya que para 4.0% de cemento se obtuvo un valor de 4.21 kg/cm^2 . No obstante, únicamente para un contenido de cemento del 4.0% se logra

superar el parámetro mínimo de aceptación en el ensayo de tracción indirecta, que debe ser para la resistencia conservada más 75% (87% de resistencia conservada).

- Los valores de resistencia encontrados en el ensayo de Inmersión-Compresión, se obtuvo el mayor valor de resistencia seca (45.66 kg/cm^2) para 4% de cemento, siendo el único contenido de cemento con el que se logra superar el criterio mínimo de aceptación para la resistencia conservada en más de 75% (82% de resistencia conservada).
- El ensayo de ahuellamiento permitió evidenciar que el menor valor de deformación permanente (0.25 mm), se obtiene con un contenido de cemento de 4%.
- Con relación al módulo dinámico, para una frecuencia de carga de 4.0 Hz, a una temperatura de 20.1°C , con un contenido de 3% de cemento, se obtuvo el valor más alto de módulo (29071 kg/cm^2), sin embargo el valor de módulo para el contenido de 4% de cemento es muy aproximado al valor máximo (27812 kg/cm^2)
- Para una adición de cemento del 4% los valores de módulo para temperaturas de 9.1 y 30.1°C pasan de 37623 a 23322 kg/cm^2 , con una frecuencia de carga de 4.0 Hz (velocidad aproximada de 24 Km/h), lo que implica una reducción de 38% en el valor del módulo afectando seriamente su capacidad de soporte en la estructura de pavimento.
- Es prudente restringir el uso de esta mezcla para zonas de clima cálido teniendo presente que para este tipo de zonas se recomienda utilizar asfaltos duros, es decir con valores de penetración bajos (asfaltos 60-70) y los asfaltos empleados en la ciudad de Bogotá manejan generalmente, valores de penetración entre 80-100.
- En los ensayos de caracterización granulométrica y del asfalto recuperado del RAP, se observó que el RAP es un material que no cumple a cabalidad con los parámetros de aceptación establecidos en las especificaciones, lo cual se

evidenció al observar el envejecimiento avanzado del asfalto y el alto porcentaje de desgaste en la máquina de los Ángeles.

- Es pertinente concluir que la mezcla bituminosa reciclada con adición de cemento presenta una buena competencia mecánica relativa a las mezclas en caliente y a los parámetros mínimos de aceptación establecidos en las especificaciones.
- Es importante garantizar el tiempo mínimo de curado para la mezcla reciclada (7 días) antes de poner al servicio al tráfico. En relación a la limitación de esta investigación consistente en que no se evaluó el tiempo de curado como variable del comportamiento mecánico. Consecuentemente, para tiempos menores a 7 días no es posible garantizar que la mezcla asfáltica ofrezca a la estructura de pavimento las resistencias mínimas que se consideraron durante el diseño, pudiendo presentarse prematuramente ahuellamientos y deformaciones en el pavimento.
- De acuerdo al comportamiento de las briquetas observado en el ensayo de ahuellamiento, se podría decir que uno de los beneficios de adicionar cemento portland a la mezcla reciclada, es el aumento de la durabilidad de la mezcla en función del tráfico representado por la rueda cargada.
- La adición de cemento a la mezcla reciclada garantiza un mejor comportamiento de la resistencia conservada, tanto en el ensayo de tracción indirecta como en el ensayo de compresión-inmersión, haciéndola menos susceptible al efecto del agua y por ende más durable.
- En la práctica, durante la realización del ensayo de ahuellamiento, se evidencio que las briquetas conformadas con adiciones de cemento (2% y 4%), presentaban un comportamiento más favorable frente a la acción de la máquina de la rueda cargada, conservando su geometría original, mientras que las briquetas que no contenían adición de cemento (0%) al terminar el ensayo quedaron completamente destruidas. Lo anterior se puede asociar a una mayor durabilidad de la mezcla y mejor comportamiento mecánico con respecto a las mezclas sin adición de cemento.

4.2 Recomendaciones

- La mezcla reciclada en frío con adición de cemento es una buena alternativa para la conformación de capas en las estructuras de pavimento, en zonas donde es difícil la consecución de materiales con propiedades geomecánicas adecuadas, principalmente a causa de los elevados costos ya sea del material o del acarreo de estos; esta condición se presenta con frecuencia en zonas deprimidas económicamente, donde este tipo de soluciones resultan ser muy viables y favorables en cuanto a su costo y facilidad constructiva, pues no se requieren equipos de construcción muy especializados, además de que los espesores de material requerido no son muy grandes, debido al tipo de vehículos comerciales (buses y camiones) que transitan en estos lugares que se reducen a unos pocos diarios (menos de 20 vehículos por día).
- En consideración al análisis de la caracterización mecánica desarrollada a partir de los ensayos efectuados en esta investigación, se recomienda el uso de la mezcla reciclada como capa de base y rodadura asfáltica, para proyectos cuyo tránsito no supere 0.5×10^6 ejes equivalentes de 80 kN (tránsitos bajos: tipo T1 INVÍAS 100-13, o tipo T0 a T1 IDU 107-11), sin embargo es de vital importancia considerar la aplicación de un tratamiento superficial o de sello, con el objetivo de aportar durabilidad a la mezcla y resistencia a los efectos nocivos del agua sobre la misma. Para proyectos donde se supere este número de ejes (tránsitos medios y altos: tipo T2 y T3 INVIAS 100-13, o tipo T2 a T5 IDU 107-11), se recomienda el uso de la mezcla reciclada únicamente para capas de base asfáltica, ya que la mezcla presenta un valor de flujo por encima de 4.0 o 3.5 mm, que es lo establecido en la especificación técnica IDU 510-11, lo cual puede redundar en ahuellamientos y deformaciones prematuras importantes.
- Puesto que el material de RAP se obtuvo de mezclas asfálticas existentes en la ciudad de Bogotá, se recomienda el uso de la mezcla reciclada en zonas de condiciones climáticas similares. En cuanto a zonas de clima cálido se sugiere limitar el empleo de esta mezcla a capas de base asfáltica en pavimentos con

tránsitos inferiores a 0.5×10^6 (tránsitos bajos: tipo T1 INVÍAS, o tipo T0 a T1 IDU 107-11), ya que para mayores temperaturas del lugar del proyecto los valores de módulo dinámico se ven reducidos significativamente.

- Se recomienda investigar la influencia que tienen en las propiedades mecánicas de la mezcla, los métodos mediante los cuales se establece el contenido óptimo teórico de emulsión asfáltica y agua, específicamente para mezclas asfálticas que usen pavimento reciclado como agregado.
- Debe estudiarse a fondo el efecto del tiempo de curado sobre la mezcla reciclada en frío con adiciones de cemento. Lo anterior en consideración a que el cemento es un material que reacciona con el agua y aporta resistencia a la mezcla progresivamente mientras se cura, lo cual no pudo comprobarse en esta investigación
- Dada la heterogeneidad del material fresado, es importante realizar más investigaciones en las cuales se asocie la caracterización desde el punto de vista granulométrico y del asfalto recuperado del RAP, con las propiedades mecánicas de la mezcla.
- Para emplear las mezclas recicladas en frío en proyectos viales, antes de realizar la conformación de la mezcla, es recomendable inicialmente hacer una caracterización completa del RAP desde el punto de vista granulométrico y del asfalto recuperado. Lo anterior puede completarse, considerando una integración de agregado RAP en un solo material, asegurándose que los distintos lotes de fresado se distribuyan homogéneamente.

Bibliografía

Arenas H., Tecnología del cemento asfáltico. Ed. Faid, editores, 2005.

AUSCULTAR LTDA, Contrato de obras y actividades para la malla vial arterial, intermedia y local del distrito de conservación del grupo N°3 (Suroriente), en la ciudad de Bogotá D.C. – 2009.

AUSCULTAR LTDA, Estudio geotécnico y diseño de pavimentos cll 31 sur – cll 29sur – Kr 8ae – kr51 y cll 31 b sur, Quiroga La Ye – San Pedro – Libertadores – Marruecos y Quiroga I sector, Contrato IDU – 071 – 2008.

Ávila G.E., Experiencias en obras de fresado estabilizado en la localidad de Engativá en Bogotá, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. 2011.

BATEMAN INGENIERÍA, Contrato de obras y actividades para la malla vial arterial, intermedia y local del distrito de conservación del grupo N°3 (Suroriente), en la ciudad de Bogotá D.C. – 2013.

Botasso, H.G., Cuattrocchio, A.C., Rebollo O.R., Soengas C. J., Reciclado de pavimentos asfálticos en frío. Una forma de utilizar totalmente el RAP para el mantenimiento y rehabilitación de la red caminera. Centro de Investigaciones Viales Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional La Plata. Buenos Aires, Argentina, 2008.

Bracho C., Emulsiones Asfálticas Usos, Universidad de los Andes, Merida – Venezuela, Versión 2 (2002).

Burbano C. y Zuluaga D., Influencia de la granulometría y la dosificación en el fresado estabilizado con emulsión asfáltica, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., 2011.

Del Aguila P., Caracterización del asfalto recuperado de una carpeta en servicio para la evaluación del pavimento. Perú, 2005.

Díaz A.A., Estudio del comportamiento de las mezclas recicladas en frío con emulsión incorporando distintos materiales de adición, Tesis menor, Universidad Politécnica de Cataluña, España. 2005.

Epps J. A., Allen D. D., Cold-recycled bituminous concrete using bituminous materials, Transportation Research Board, National Research Council (U.S.A.) (1990).

Fabela M., Proceso de remoción de carpetas asfáltica, publicación técnica N°121 Secretaría de Comunicaciones y transportes – Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México, 1999.

Fernández W., Rondón H. y Reyes F., Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas - estado del conocimiento, 2011.

Ficha técnica para emulsiones asfálticas, Manufacturas y Procesos Industriales (MPI) Ltda, 2008.

Flor G., Aprovechamiento de hormigón reciclado en obras viales. Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 2012.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas – ICONTEC, Norma Técnica Colombiana NTC 121 (Tercera actualización), Especificación de desempeño para concreto hidráulico, Colombia, 2014.

Instituto de Desarrollo Urbano - IDU, Bogotá, Guía para reciclaje de pavimento asfáltico in situ estabilizado con aditivos bituminosos y/o hidráulicos GU-GE-011, Colombia, 2011.

Instituto de Desarrollo Urbano, Bogotá - IDU, Guía para la estabilización del material producto del reciclaje en fría de pavimentos asfálticos, GU-GE-010, Colombia, 2011.

Instituto de Desarrollo Urbano, Bogotá, Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá D.C. – IDU ET 2011, Instituto de Desarrollo Urbano, Bogotá, Colombia, 2011.

Instituto Nacional de Vías – INVIAS, Especificaciones generales de construcción de vías, Colombia, 2013.

Leiva F., Módulo dinámico de mezclas asfálticas, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales – Universidad de Costa Rica , San José, Costa Rica, 2004

Leiva F., Módulo dinámico de mezclas asfálticas, LANAMME., (Costa Rica), 2004.

Loria-Salazar L.G en
<https://groups.yahoo.com/neo/groups/Camineros/conversations/topics/5721>, 2010.

Loria-Salazar L.G., Evaluation of New and Existing Test Methods to Assess Recycled Asphalt Pavement Properties for Mix Design. Tesis doctoral, University of Nevada, Reno, USA. 2011.

Lundstrom R., Di Benedetto H e ISACSSON U., Influence of asphalt mixture stiffness on fatigue failure. Journal of materials in civil engineering ASCE, 2004.

Marini S., Reciclado de pavimentos en frío, Centro de Investigaciones Viales Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional La Plata. Buenos Aires, Argentina, 2006.

Martínez-Echeverría M.J, Estudio del procedimiento de compactación en laboratorio para mezclas recicladas en frío con emulsión bituminosa. Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería - Universidad de Granada, España, 2012.

Mercado R., Bracho C., Avendaño J., Emulsiones Asfálticas Usos – Rompimiento, Laboratorio de formulación, interfases, reología y procesos, Universidad de los Andes, Merida – Venezuela, Versión 1, 2008.

Montejo A., Ingeniería de pavimentos. 3 ed. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia, 2006.

Montepara. A. y Giuliani F., The role of cement in the recycling of asphalt pavement cold-stabilized with bituminous emulsions, Second international symposium on maintenance and rehabilitation of pavements and technological control, Auburn, Alabama, USA. 2003.

Montero J., Clasificación y caracterización de los agregados pétreos para carreteras en Colombia. Curso Seminario Internacional sobre Aspectos Petrológicos y climáticos del comportamiento de los agregados en pavimentos y concretos. Sociedad Colombiana de Geotecnia, Ingeominas, 2010.

Needham D., Brown S., A study of cement modified bitumen emulsion mixtures, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 69, 2000.

Niazi Y, Jalili M., Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion, *Construction and Building Materials*, vol. 23, 2009

Oulahna D., Zizi Z., y Benhassaine A., Bitumen emulsion - cement: hydraulic reactivity and breaking of the emulsion, *Euroasphalt & Eurobitume congress*. Strasbourg (France), 1996.

Pérez D., Seguimiento y evaluación del reciclado in-situ con emulsión de un firme de tráfico pesado, Tesis menor, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2003.

Potti J. J., Martínez M. y Mancebo J., Avances en el campo de los reciclados. Reciclado mixto con emulsión y cemento. VI Congreso Nacional de Firmes, 2004.

Reyes F., Diseño racional de pavimentos, Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia, 2003.

Reyes-Ortiz O., Pérez J. y Narváez J., Estudio del comportamiento de mezclas asfálticas frías con granulometrías colombianas, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., 2012.

Rivera G., Emulsiones Asfálticas, Ed. Alfaomega, cuarta edición, México D.F. 1998.

Rodríguez R., Castaño V., Martínez M., Emulsiones Asfálticas, Secretaría de Comunicaciones y transportes – Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro, 2001.

Sarmiento M. A., Estudio del Comportamiento de una mezcla asfáltica fabricada con emulsión, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2012.

Thenoux G y Garcia G., Estudio de técnicas de reciclado en frío: tercera parte (Diseño de mezclas recicladas en frío en base a emulsiones), Revista Ingeniería de Construcción Volumen 16 N°1, España, Enero Junio de 2001

Vásquez Varela L.R en <https://sites.google.com/site/ingepav/Home>, (2002)

Witczak W., development of a master curve (e^*) database for lime modified asphaltic mixtures. Arizona State University, July 2004.

<http://fontisito.com/index.php?option=com>

<http://prt2.uprm.edu/Microestructura.pdf>

<http://webidu.idu.gov.co:9090/jspui/bitstream/123456789/35401/20/60018341-10.pdf>

<http://www.anter.es/pdf/L1.pdf>

<http://www.cemexcolombia.com/>

<http://www.ecopetrol.com.co>

<http://www.incoasfaltos.com/fichas/80-100.pdf>

<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.HidratacionCEMENTO.pdf>

A. Anexo: Metodologías para la estimación del contenido óptimo de emulsión asfáltica para mezclas frías recicladas

- **Método del Instituto de Asfalto (1999)**

En este método (*Asphalt Institute*, 1999), luego de realizar la respectiva caracterización de los materiales y seleccionar la emulsión asfáltica, se determina un contenido teórico de ligante que permita iniciar las pruebas de caracterización de las mezclas mediante la determinación del Equivalente Centrífugo de Keroseno (CKE), incrementándolo en el 40%. La norma española NLT 169/72 describe detalladamente el procedimiento para la determinación de CKE.

El procedimiento para desarrollar el ensayo de envuelta se explica detalladamente en el numeral A.4.3.2 de la norma INV E-738. Este ensayo se utiliza en la determinación del contenido óptimo de fluidos con el que se logre un mezclado adecuado y como criterio para evaluar la compatibilidad de la emulsión con los agregados. Este contenido óptimo de fluidos se define como el total correspondiente a la adición de emulsión asfáltica, agua añadida y humedad natural del agregado y se emplea en la preparación de las sucesivas muestras del ensayo.

La determinación del contenido óptimo de fluidos para la compactación, se realiza preparando una prueba que permita obtener una relación de densidad seca y porcentaje de fluidos, realizado con tres muestras de diferentes contenidos de agua.

El método de diseño establece diferencias, en relación con el tiempo de curado para las pruebas de determinación del contenido óptimo de emulsión, de acuerdo a si la mezcla se utiliza como base, capa de rodadura temporal o definitiva.

Se determinan en todos los casos las densidades y se calculan los volúmenes de vacíos en la mezcla, volumen de asfalto y de materiales pétreos en todas las briquetas. Para la caracterización de las mezclas se utiliza el estabilómetro de Hveem y el ensayo del cohesiómetro a 73°F (23°C). Según el manual del Instituto del Asfalto, (1973) el ensayo de estabilómetro es un tipo de triaxial que aplica cargas verticales y mide presiones laterales con lo que se calcula la estabilidad de la briquetas. Así mismo el ensayo de cohesiómetro es una especie de ensayo de flexión que generalmente se aplica luego del estabilómetro, en el que la biqueta se rompe por tracción. Se calcula la resistencia total de cada probeta ensayada empleando la Estabilidad R alcanzada y la Cohesión C, mediante la expresión: $R_t = R + 0.05C$.

▪ **Método Marshall Modificado para Emulsiones**

Consiste en utilizar las mismas probetas, martillo y equipo que se emplean para el diseño de mezclas asfálticas en caliente con el método Marshall, el cual está concebido para el desarrollo de mezclas con tamaños de agregado menores de 25.4 mm (1"). Las briquetas se compactan con varios contenidos de ligante, a las cuales se les determina su densidad, porcentaje de vacíos, porcentaje de vacíos rellenos de asfalto, porcentaje de vacíos en los agregados y se les mide la estabilidad y deformación en sentido diametral, cuando las muestras son sometidas a unas condiciones desfavorables de humedad y temperatura.

El cálculo teórico del contenido óptimo de emulsión como contenido inicial en las pruebas, se basa en la utilización de las fórmulas empíricas del Método de Duriez (Francia). La metodología se relaciona a continuación, de acuerdo a lo expuesto por Bracho (2002). Inicialmente se determina el factor de superficie específica (FSE) mediante la Ecuación 7.

$$F.S.E. \left[\frac{m^2}{Kg} \right] = \frac{2.5}{\sqrt[2]{D * d}}$$

Ecuación 7

Dónde:

D=Tamaño máximo del agregado (diámetro mayor en mm)

d=Tamaño mínimo del agregado (diámetro menor en mm)

Posteriormente se aplica la Ecuación 7 para cada fracción del agregado y así obtener los factores que multiplican a cada porcentaje retenido en determinado tamiz, lo cual permite estimar la superficie específica del conjunto de agregados (SE) (ver Ecuación 8)

$$S.E = \frac{FSE_1 * \%Ret_1 + FSE_2 * \%Ret_2 + FSE_3 * \%Ret_3 + \dots}{100} \quad \text{Ecuación 8}$$

Siendo:

FSE_0 = Factor de superficie específica de fracción del material

$\%Ret_0$ =Porcentaje retenido parcial en cada tamiz

De acuerdo con esto el INVIAS recomienda el uso de los tamices 10 mm, 4.76 mm, 0.3 mm y 0.075 mm y establece los factores de superficie específica para los mismos, tal como se muestra en la Tabla 39.

Tabla 39: Tamices recomendados por el INVIAS para la aplicación de las fórmulas de Duriez

Tamaño del agregado	Porcentaje de la masa seca del agregado	F.S.E
>10	A	0.17
4.76 - 10	B	0.33
0.3 – 4.76	C	2.3
0.075 – 0.3	D	12
0.075	F	135

Fuente: Anexo A de la norma INV E – 738

Según el INVIAS (Anexo A de la norma INV E – 738) la superficie específica del conjunto de agregados se calcula con la Ecuación 9 y con los valores referidos en la Tabla 39.

$$100 \sum = 0.17 * A + 0.33 * B + 2.3 * C + 12 * D + 135 * F \quad \text{Ecuación 9}$$

Consecuentemente se determina el porcentaje teórico de cemento asfáltico mediante la Ecuación 10.

$$\%C.A = K * \sqrt[5]{S.E * A} \quad \text{Ecuación 10}$$

Dónde:

%C.A. = Porcentaje de cemento asfáltico teórico en la mezcla, basado en peso del agregado seco.

K = Coeficiente o módulo de riqueza que depende de la granulometría del material.

A = Factor de corrección por densidad.

El factor A es utilizado únicamente en mezclas abiertas y lechadas asfálticas, para las demás mezclas se toma el valor de 1. Es una variable que depende del peso específico del agregado (PE) y se obtiene mediante la Ecuación 11.

$$A = 1.98857 - 0.37143 * PE \quad \text{Ecuación 11}$$

Posteriormente se evalúa el valor de K, que es un factor que depende de la granulometría del agregado y cuyos valores se relaciona en la Tabla 40.

Tabla 40: Valores de K

Mezcla		K
Lechada		4.4 – 5.1
Densa		3.7 – 4.0
Grava - Emulsión		2.5 – 2.7
Abierta	Rodadura	3.5 – 3.7
	Otros	2.5 – 2.7
Arena - Emulsión		3.2

Fuente: Adaptada de Bracho (2002)

El Instituto nacional de Vías, recomienda valores K entre 3.5 y 4.5 para mezclas densas. Finalmente el porcentaje óptimo teórico de emulsión en la mezcla se calcula mediante la Ecuación 12.

$$\%E = \frac{\%CA}{C} * 100$$

Ecuación 12

Siendo:

C = Concentración de asfalto en la emulsión en porcentaje.

%E = Porcentaje de emulsión asfáltica.

Con el contenido óptimo teórico de emulsión asfáltica, se hacen pruebas de mezclado, con diferentes cantidades de agua agregada al material pétreo (que para el caso específico de estudio sería el RAP), lo que permite obtener el contenido óptimo de agua de preenvuelta y mezclado, cuya selección corresponde al porcentaje con el cual se logre la mejor envuelta y trabajabilidad de la mezcla.

En la fabricación de las probetas se utilizan cantidades de asfalto que varían a partir del contenido teórico calculado en +0,5%; +1,0%; -0,5%; -1,0%; tres probetas por cada porcentaje de emulsión y utilizando el contenido de emulsión y agua óptimos para el mezclado. Las mezclas elaboradas se dejan en curado durante 24 horas para que el asfalto en forma de emulsión desarrolle la cohesión y adhesividad como ligante, y se complementa dejando otras 24 horas la mezcla en un horno a la temperatura controlada de 60°C hasta que se tenga un peso constante.

▪ Método de la Universidad de Illinois

El contenido de emulsión inicial para el comienzo de las pruebas se determina mediante la Ecuación 13, que es una fórmula empírica basada en la granulometría del material recuperado del fresado.

$$E = 0.05 * A + 0.1 * B + 0.5 * C$$

Ecuación 13

Dónde:

E = porcentaje teórico en peso de la emulsión asfáltica.

A = Porcentaje de agregado que queda retenido en el #8 (2.36 mm)

$B = (\text{Pasa tamiz N}^\circ 8(2.36 \text{ mm})) - (\text{Pasa tamiz N}^\circ 200(75\mu\text{m}))$.

$C = \text{Material pasa por el tamiz N}^\circ 200(75\mu\text{m})$

El método recomienda en el ensayo de envuelta un porcentaje inicial de agua de 0% para el caso de emulsiones aniónicas y de 3% para catiónicas, y las envueltas posteriores con un incremento de 1%. Se evalúa por estimación visual, la apariencia de la superficie seca mezclada, a través del porcentaje de cobertura y se considera aceptable un porcentaje del 50%, rechazándose cuando ninguna de las muestras alcanza una cobertura del 50%. No obstante Bracho, (2002) afirma que en el manual N°14 del Instituto del Asfalto se plantea la Ecuación 13, pero reduciendo el valor del porcentaje óptimo teórico de emulsión asfáltica en 30%, tal como se observa en la Ecuación 14.

$$E = (0.05 * A + 0.1 * B + 0.5 * C) * 0.7 \quad \text{Ecuación 14}$$

Así mismo Bracho, (2002) describe que mediante experiencias desarrolladas en Venezuela con agregados vírgenes, los valores obtenidos con la fórmula de Illinois deben reducirse en un 15% (ver Ecuación 15)

$$E = (0.05 * A + 0.1 * B + 0.5 * C) * 0.85 \quad \text{Ecuación 15}$$

Para obtener la humedad de compactación, es suficiente evaluar cinco contenidos de agua y se preparan tres muestras en cada uno de dichos contenidos. En la preparación de las muestras se consideran dos situaciones. El primer caso considera que si el contenido de agua que se va a añadir es menor que el mínimo obtenido en la envuelta, se requiere entonces que se adicione suficiente cantidad de agua para el mezclado y luego secarla en un horno a $200 \pm 5^\circ\text{F}$ ($93 \pm 5^\circ\text{C}$), hasta alcanzar un peso que difiera 20 gramos del requerido, y así la mezcla estará lista para la compactación. El segundo caso se presenta cuando el contenido de agua es mayor o igual al mínimo obtenido en el ensayo de envuelta, entonces el agregado, el agua y la emulsión se mezclan pero sin calentarla en el horno, es decir, la mezcla está lista para la compactación inmediatamente después del mezclado.

Las mezclas se compactan en los moldes Marshall, usando 75 golpes por cara y son curadas durante 24 horas a $72(+/-)3^{\circ}\text{F}$ ($22.2+/-3^{\circ}\text{C}$), sin desmoldarla. Se someten posteriormente al ensayo de estabilidad Marshall. El contenido de agua que tenga el mayor promedio de estabilidad es considerado como el óptimo de compactación. Si este contenido es mayor que el contenido óptimo establecido en el ensayo de envuelta, no existirían diferencias entre el contenido de agua para el mezclado y la compactación. Si ocurre lo contrario existirían diferencias y sería necesario secar todas las mezclas sucesivas que se preparen.

Se preparan seis probetas para cada uno de los cinco contenidos de asfalto residual: dos contenidos debajo del contenido teórico, dos por encima y uno con el contenido teórico.

Tres muestras serán compactadas en el molde Marshall estándar y las otras tres en moldes especialmente tratados por accesorio perforado en un plato metálico. El contenido de emulsión seleccionado en la mezcla debe satisfacer un valor mínimo de estabilidad de 500 lb (2,224N) para probetas ensayadas a 72°F ($22,2^{\circ}\text{C}$). Se exige que el porcentaje de vacíos se encuentre entre 2% y 8%; la pérdida de estabilidad en porcentaje, después de 4 días de inmersión a 72°F ($22,2^{\circ}\text{C}$), no deberá ser mayor al 50%, y el porcentaje de agua absorbida será máximo de 4%. El porcentaje mínimo de cobertura con los agregados se debe ser del 50%.

▪ **Método de la Compañía Chevron**

Se realizan ensayos de envuelta con diferentes cantidades de agua y de emulsión, y sólo con los agregados que pasen por el tamiz de $\frac{3}{4}$ ", sustituyendo el material que se retiene por una cantidad equivalente de material pasado, con el propósito de lograr una cobertura satisfactoria. En las mezclas para capas de base se estipula que la envuelta sea del 50%, mientras que en las mezclas para capas de rodadura se debe alcanzar el 75% de cobertura de los agregados.

Los contenidos óptimos de agua y emulsión para la compactación se determinan mediante una prueba de compactación en la cual se prepara una probeta compactada inmediatamente después de mezclada, y otras dos después de airearla. Después de

compactadas mediante el compactador de Hveem (10 a 50 golpes de $1,725 \text{ kN/m}^2$), seguido de una carga estática de doble efecto de 10.500 kg, se secan en un horno hasta peso constante, y se obtiene la curva de densidad vs. Porcentaje de fluidos (agua + emulsión), donde el máximo de densidad indica el porcentaje de fluidos óptimo para la compactación.

Se preparan 4 probetas por cada contenido diferente de emulsión, correspondientes a 1.1, 1.4 y 1.7 veces el equivalente Centrifugo de Keroseno (CKE), y se dejan curar en dos grupos en diferentes condiciones. El primer grupo se deja en el molde con el eje en posición horizontal, y a temperatura ambiente durante 72 horas. Después de desmoldarlas se desecan al vacío durante 4 días, se saturan posteriormente durante 1 hora a temperatura ambiente y se le aplica una presión de 100 mm/Hg durante otra hora. Posteriormente se realiza el ensayo de módulo resiliente a temperatura ambiente. El segundo grupo de probetas sólo se somete a un proceso de curado a temperatura ambiente durante 72 horas. (Epps et al., 1990)

▪ California Test 378

Esta norma utilizada por el Departamento de Transportes de California (California Department of Transportation, 2000) describe la metodología a seguir para determinar el porcentaje óptimo de emulsión en los reciclados en frío de mezclas bituminosas.

Las muestras para el diseño en laboratorio se pueden obtener de dos formas diferentes: las que proceden de testigos o trozos de pavimentos y las mezclas que proceden de material fresado en el campo.

En el primer caso el material fresado se tritura en laboratorio y se conforma una granulometría que corresponde aproximadamente con el 100% pasado por el tamiz de 25 mm, el 70% pasado por el tamiz N° 4, y para los tamices intermedios ($3/4''$ y $3/8''$) se fija el porcentaje que debe pasar mediante el trazado de una línea recta entre los puntos dibujados para los tamices de 1 pulgada y N° 4. En el segundo caso, se deben preparar muestras representativas del material producido en el fresado, y se determina la granulometría por tamizado a través de los siguientes tamaños: 1, $1/2''$, $1''$, $3/4''$, N°4, $3/8''$.

En cualquier caso debe determinarse la viscosidad del asfalto envejecido, recuperado de la mezcla.

El contenido aproximado total de asfalto requerido (ABR) empleado en el comienzo de las pruebas, se calcula mediante la Ecuación 16, la cual es una fórmula empírica que tiene en cuenta los porcentajes pasados y/o retenidos por los tamices N° 8 y N° 200, del agregado obtenido después de la extracción del asfalto:

$$ABR = \frac{4 * R + 7 * S + 12 * F}{100} * 1.1 \quad \text{Ecuación 16}$$

Siendo, después de la extracción de asfalto:

R = Porcentaje retenido en el tamiz N°8 (2.36 mm)

S = Porcentaje que pasa el tamiz N°8 (2.36 mm) y retenido en el tamiz N°200 (75 µm)

F = Porcentaje que pasa el tamiz N°200 (75 µm)

Luego, a este contenido aproximado total de asfalto requerido (ABR), se le resta el contenido de asfalto obtenido de la extracción y se divide el resultado por 0.6, para así obtener el porcentaje teórico de emulsión asfáltica a adicionar.

En el método se utiliza un nomograma de viscosidad para determinar la consistencia de la emulsión asfáltica, dibujando la viscosidad del asfalto envejecido y la viscosidad del residuo para las diferentes emulsiones disponibles, creando así una familia de curvas.

Las muestras de ensayo se preparan para la evaluación en el estabilómetro, con la adición inicial del 2% de agua de preenvuelta, variando los porcentajes de emulsión respecto al valor inicial en incrementos de 0.8%. En la práctica se incrementa el contenido en una muestra y se decrece en dos, y las mezclas son curadas en un horno a una temperatura de 140°F (60 °C) por 16 horas.

El ensayo del estabilómetro se realiza a una temperatura de 140°F (60 °C), para lo cual se preparan briquetas con alturas entre 2.40 y 2.60 pulgadas. Posteriormente se

determina previamente la gravedad específica y se calcula el contenido de vacíos. El contenido óptimo de asfalto será el mayor contenido de emulsión que produce una probeta con el valor deseado en el ensayo de estabilómetro, sin evidencia de superficie exudada y un contenido mínimo de 4% de vacíos. El valor requerido para capas de rodadura es un mínimo de 30 como valor de resistencia en el estabilómetro de Hveem, mientras que para bermas, se requiere un mínimo de 25.

Por último es necesaria una corrección del grado de la emulsión, para lo cual se vuelve a dibujar el contenido final de ligante en el nomograma de viscosidad. Si este resultado difiere del ensayado se debe repetir el procedimiento usando la cantidad recomendada con la nueva emulsión designada.

▪ Método del instituto del asfalto (1983)

Según Thenoux y García, (2001) el método, busca determinar un porcentaje de asfalto residual por peso de la mezcla, aplicando una fórmula empírica basada en el material retenido en el tamiz N°8 (a), el retenido en el tamiz N°200 pero que pasa el N°8 (b), el porcentaje de material que pasa el Tamiz N°200 (c y K) y la absorción del agregado (F). En lo referido al factor F, varía entre 0 y 2 basado en una gravedad específica del material de 2.6 a 2.7; pero sugiere un rango entre 0.7 y 1.0.

Figura 36: Método del Instituto del asfalto para determinar el contenido óptimo teórico de emulsión

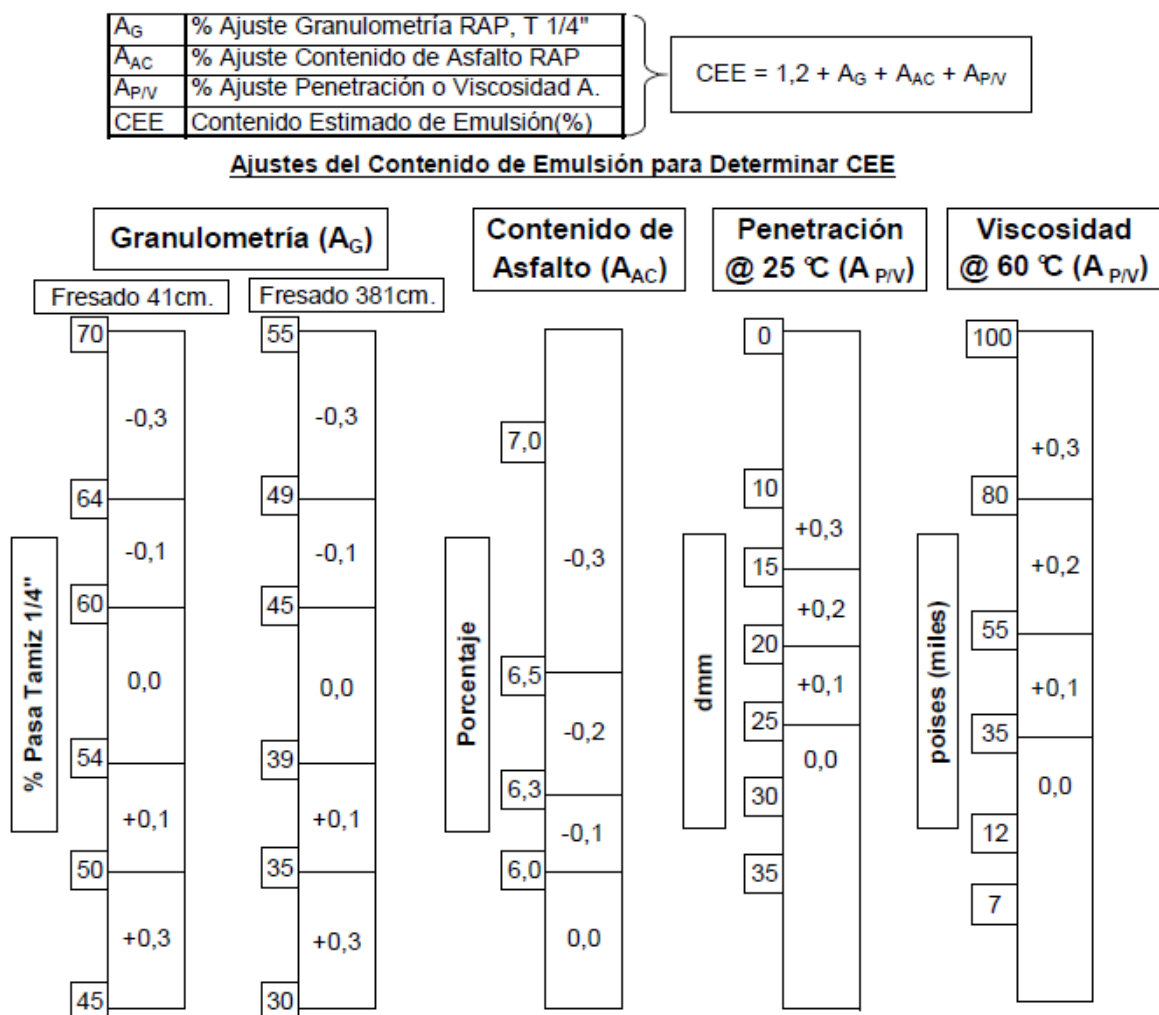
a	% Ret.N°8		$P_c = 0,035 \times a + 0,045 \times b + K \times c + F$
b	% Pasa N°8 y Ret.N°200		
c	% Pasa N°200		
K	0,15 Si % Pasa N°200 es 11-15		
	0,18 Si % Pasa N°200 es 6-10		
	0,20 Si % Pasa N°200 es 5 o menos		
F	0 a 2,0 por absorción; 0,7 a 1,0 normal		
Pc	% Asf. Resi. Total por peso de mezcla		
CAR	Contenido de Asfalto del RAP(%)		$CEE = \frac{P_c - CAR \times 100}{CARE}$
CARE	Contenido Asfalto Residual Emulsión(%)		
CEE	Contenido Estimado de Emulsión(%)		

Fuente: Thenoux y García, (2001)

Cuando no se cuente con estos datos, lo que cubriría la mayoría de las condiciones que se presenten y por lo tanto, será un dato de “apreciación” de quien utilice el método. Una vez determinado el porcentaje de asfalto residual (P_c) y conociendo el “Contenido de Asfalto de una Emulsión” dada (CARE) se llega al “Contenido Estimado de Emulsión” (CEE), que es el mismo contenido óptimo teórico de emulsión asfáltica. El método se resume convenientemente en la Figura 36.

▪ **Método del Departamento de Transporte de Estado de Oregon (USA)**

Figura 37: Método del Estado de Oregon (USA) para determinar el contenido óptimo teórico de emulsión



Fuente: Thenoux y García, (2001)

De acuerdo con Thenoux y García, (2001) el método establece ajustes a un contenido inicial de emulsión de 1.2% en peso de RAP, a partir de la caracterización granulométrica del material fresado por una máquina de 41 cm de ancho. Esto a su vez se correlaciona con el fresado resultado de una máquina de 381 cm de ancho.

El método también requiere que se recupere el asfalto envejecido para saber que contenido de asfalto tiene la mezcla y así mismo, realizar ensayos de penetración y viscosidad sobre muestras de asfalto recuperado. La metodología del Estado de Oregon para estimar el contenido óptimo teórico de emulsión asfáltica se muestra en la Figura 37.

B. Anexo: Aplicación de las metodologías para estimar el contenido óptimo de emulsión asfáltica en las mezclas frías recicladas

▪ Formulas empíricas de Duriez

Inicialmente se calcula la superficie específica de los agregados utilizando los factores de superficie específica que recomienda el INVIAS en el Anexo A de la norma INV E-738-07, los cuales se encuentran descritos en la Tabla 39 y se calculan en la Ecuación 17 y la Ecuación 18. Los porcentajes retenidos en los determinados tamices corresponden a la granulometría ajustada con la especificación IDU, que se puede observar en la Figura 10.

$$S.E. = \frac{0.17 * 32\% + 0.33 * 16\% + 2.3 * 37\% + 12 * 1\% + 135 * 5\%}{100} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$S.E. = 8.91 \frac{m^2}{Kg} \quad \text{Ecuación 18}$$

Seguidamente calculamos el porcentaje de cemento asfáltico requerido, utilizando los coeficientes de riqueza recomendados por el INVIAS de 3.5 y 4.5, tal como se muestra en la Tabla 41.

Tabla 41: Cálculo del porcentaje de cemento asfáltico requerido, según Duriez.

K=3.5	K=4.5
$\%C.A. = 3.5 * \sqrt[5]{8.91}$	$\%C.A. = 4.5 * \sqrt[5]{8.91}$
$\%C.A. = 5.4$	$\%C.A. = 7.0$

Finalmente el porcentaje óptimo teórico de la mezcla se muestra en la Tabla 42, teniendo en cuenta que para la emulsión que se va a emplear se reporta un valor de 62.3% de contenido de asfalto:

Tabla 42: Cálculo del porcentaje óptimo teórico de emulsión asfáltica, según Duriez.

K=3.5	K=4.5
$\%E = \frac{5.4}{62.3} * 100$	$\%E = \frac{7.0}{62.3} * 100$
$\%E = 8.7$	$\%E = 11.2$

De acuerdo con lo anterior, el porcentaje óptimo teórico de emulsión asfáltica, según Duriez, se encuentra entre 8.7% y el 11.2%. El contenido inicial de agua sugerido por este método, es aquel que proporcione una buena trabajabilidad durante el procedimiento de mezclado.

Es evidente que esta metodología no contempla diferencias entre el uso de un agregado virgen y uno proveniente del fresado de carpetas asfálticas, por lo tanto se obtienen valores de emulsión altos en comparación a lo que se observa que se usa en la práctica.

Los estudios realizados por la empresa Auscultar Ltda, emplean la metodología de Duriez para hallar los contenidos óptimos teóricos de emulsión asfáltica en las mezclas con RAP. Sin embargo el valor de emulsión calculado se afecta por el porcentaje de asfalto contenido en el RAP como se muestra en la Ecuación 19.

$$\%Emulsión\ teórico = \%E - \frac{\%Asfalto\ del\ RAP}{2} \quad \text{Ecuación 19}$$

Si se considera la afectación del contenido de emulsión utilizado en la práctica a partir del contenido de asfalto del RAP, se tendría para este caso el porcentaje de emulsión óptimo teórico que se muestra en la Tabla 43.

Tabla 43: Cálculo del porcentaje óptimo teórico de emulsión asfáltica, según Duriez, afectado por el porcentaje de asfalto en el RAP

K=3.5	K=4.5
$\%Emulsión\ teórico = 8.7 - \frac{5.0}{2}$	$\%Emulsión\ teórico = 11.2 - \frac{5.0}{2}$

$\%E = 6.2$	$\%E = 8.7$
-------------	-------------

Estos porcentajes se consideran más apropiados debido a que se tiene en cuenta que el asfalto del RAP continuará aportando cohesión a la mezcla que se conforme con este material.

▪ Método de Illinois

Inicialmente se identifican los porcentajes de agregado pasa tamiz N°8 y N°200 para poder aplicar la Ecuación 20 y obtener el resultado de la Ecuación 21.

$$E = 0.05 * 43\% + 0.1 * 52\% + 0.5 * 5\% \quad \text{Ecuación 20}$$

$$E = 9.8\% \quad \text{Ecuación 21}$$

Este porcentaje puede corregirse por los valores sugeridos por Bracho (2002), correspondientes a 70%, valor recomendado en el Manual N°14 del Instituto del Asfalto y 85% según Vergara (1994) en experiencias registradas en Venezuela. Las correcciones se muestran en la Tabla 44.

Tabla 44: Cálculo del porcentaje óptimo teórico de emulsión asfáltica con el método de Illinois

Instituto del asfalto	Vergara (1994)
$E = 9.8\% * 0.7$	$E = 9.8\% * 0.85$
$E = 6.9\%$	$E = 8.3\%$

De acuerdo con el método de Illinois, el porcentaje óptimo teórico de emulsión asfáltica, podría ser 9.8% que es el valor original de la fórmula o 6.9% y 8.3%, que son valores corregidos con base en experiencias registradas en otros estudios. Este método recomienda adicionar un valor inicial de 3% de agua a la mezcla cuando la emulsión a utilizar sea de polaridad catiónica.

▪ Método del ensayo de California 378

Al igual que en el método de Illinois, inicialmente se identifican los porcentajes de agregado pasa tamiz N°8 y N°200, pero para el material que se obtiene luego de la extracción de asfalto en la centrifuga con solventes y así poder aplicar la Ecuación 22 que determina el porcentaje de asfalto requerido en la mezcla.

$$ABR = \frac{4 * 18\% + 7 * 65\% + 12 * 17\%}{100} * 1.1 \quad \text{Ecuación 22}$$

$$ABR = 8.0\% \quad \text{Ecuación 23}$$

A este contenido aproximado total de asfalto requerido (ABR) que se muestra en la Ecuación 23, se le resta el contenido de asfalto obtenido de la extracción y se divide el resultado por la concentración de asfalto en la emulsión, para así obtener el porcentaje teórico de emulsión asfáltica a adicionar (Ver Ecuación 24 y Ecuación 25).

$$E = \frac{8.0\% - 5.0\%}{0.623} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$E = 4.9\% \quad \text{Ecuación 25}$$

De acuerdo con el método de California, el porcentaje óptimo teórico de emulsión asfáltica a adicionar a la mezcla es de 4.9%.

▪ Método del instituto del asfalto (1983)

Una vez más se utilizan los porcentajes de agregado pasa tamiz N°8 y N°200 para poder aplicar la fórmula que evalúa la cantidad de cemento asfáltico requerida en la mezcla, teniendo en cuenta que para el valor de K es 0.2, considerando que el porcentaje que pasa el tamiz N°200 es de 5%. Así mismo, se emplea un valor de 1.0 de afectación de la ecuación por absorción del agregado, siendo $G_s=2.15$ (ver Ecuación 26 y Ecuación 27)

$$P_c = 0.035 * 43\% + 0.045 * 52\% + 0.2 * 5\% + 1.0 \quad \text{Ecuación 26}$$

$$P_c = 5.8\% \quad \text{Ecuación 27}$$

Posteriormente se calcula el porcentaje óptimo teórico de emulsión, igual que en el método de California (ver Ecuación 28 y Ecuación 29)

$$E = \frac{5.8\% - 5.0\%}{0.623} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$E = 1.3\% \quad \text{Ecuación 29}$$

De acuerdo con el método del Instituto del asfalto, el porcentaje óptimo teórico de emulsión asfáltica a adicionar a la mezcla es de 1.3%.

▪ **Método del Departamento de Transporte de Estado de Oregon (USA)**

Como ya se mencionó anteriormente, el método establece ajustes a un contenido inicial de emulsión de 1.2% en peso de RAP, a partir de la caracterización granulométrica del material fresado por una máquina de 41 cm de ancho. Teniendo en cuenta que el porcentaje que pasa el tamiz de ¼" es de 58%, el contenido promedio de asfalto en el RAP es de 5.0% y la penetración del asfalto a 25°C es de 30 décimas de milímetro, se procede a estimar el contenido óptimo teórico de emulsión, como se muestra en la Ecuación 30 y la Ecuación 31.

$$\%E = 1.2 + 0 + 0 + 0 \quad \text{Ecuación 30}$$

$$E = 1.2\% \quad \text{Ecuación 31}$$

De acuerdo con el método del Estado de Oregon (USA), el porcentaje óptimo teórico de emulsión asfáltica a adicionar a la mezcla es de 1.2%.

C. Anexo: Curvas maestras del módulo dinámico para la mezcla MBRF+CH_33

De acuerdo con Witczak (2004), el módulo dinámico (E^*) se define como la razón del esfuerzo y la deformación bajo una carga sinusoidal continua, es decir, una relación matemática entre la amplitud del esfuerzo sinusoidal y la amplitud de la deformación sinusoidal para cualquier tiempo (t) y frecuencia de carga angular (ω), tal como se muestra en la Ecuación 32.

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 * \sin(\omega t)}{\varepsilon_0 * \sin(\omega t + \varphi)}$$

Ecuación 32

Dónde:

σ_0 = Esfuerzo máximo

ε_0 = Deformación máxima

φ = Ángulo de fase

ω = Velocidad angular

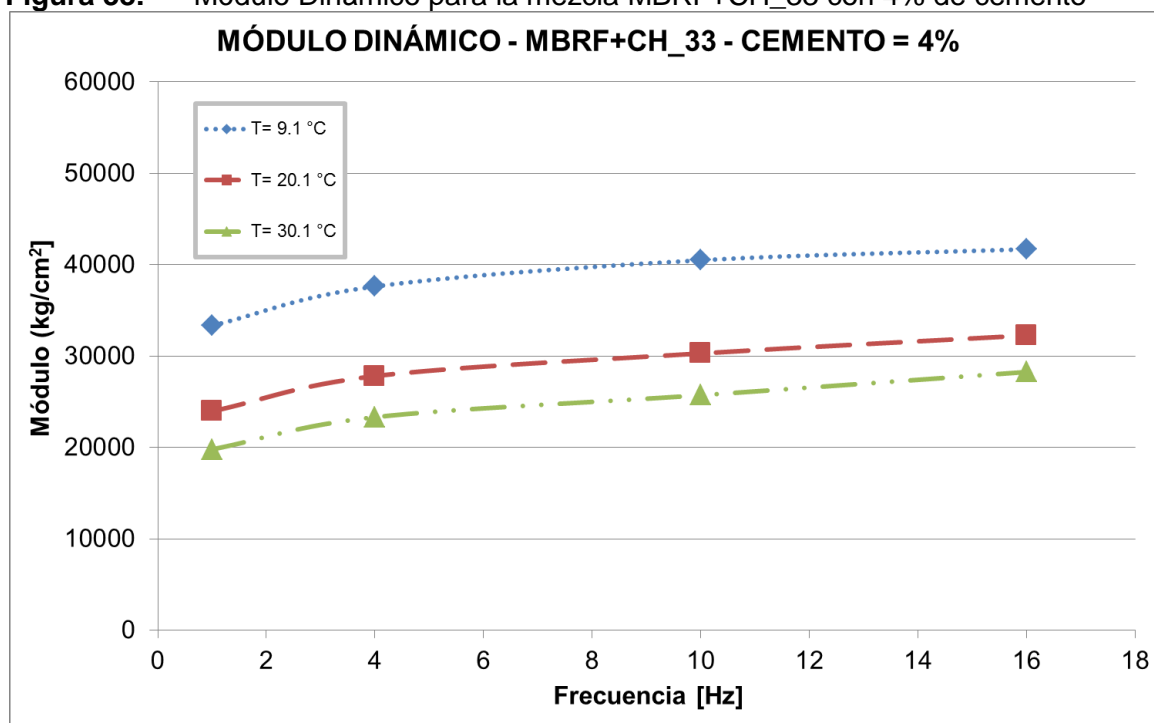
t = tiempo

Teniendo en cuenta que las propiedades del módulo dinámico son función, entre otras variables de la temperatura y la frecuencia, las briquetas preparadas mediante la metodología descrita en la sección 2.4.7, se sometieron a cargas cíclicas con cuatro frecuencias distintas y tres temperaturas diferentes.

La curva maestra representa la respuesta de la mezcla, en términos de módulo dinámico, a una temperatura de referencia seleccionada sobre un amplio rango de frecuencias, es decir, que simplifica el comportamiento reológico de la mezcla a una temperatura de referencia, que para este caso en particular será de 20.1°C.

La curva maestra para cada adición de cemento evaluada en la mezcla MBRF+CH_33 se construyó a partir de los resultados del ensayo de módulo dinámico. El procedimiento utilizado para construir las curvas maestras se ilustra con los resultados obtenidos para la mezcla MBRF+CH_33 con 4% de cemento hidráulico que se muestran en la Figura 38.

Figura 38: Módulo Dinámico para la mezcla MBRF+CH_33 con 4% de cemento



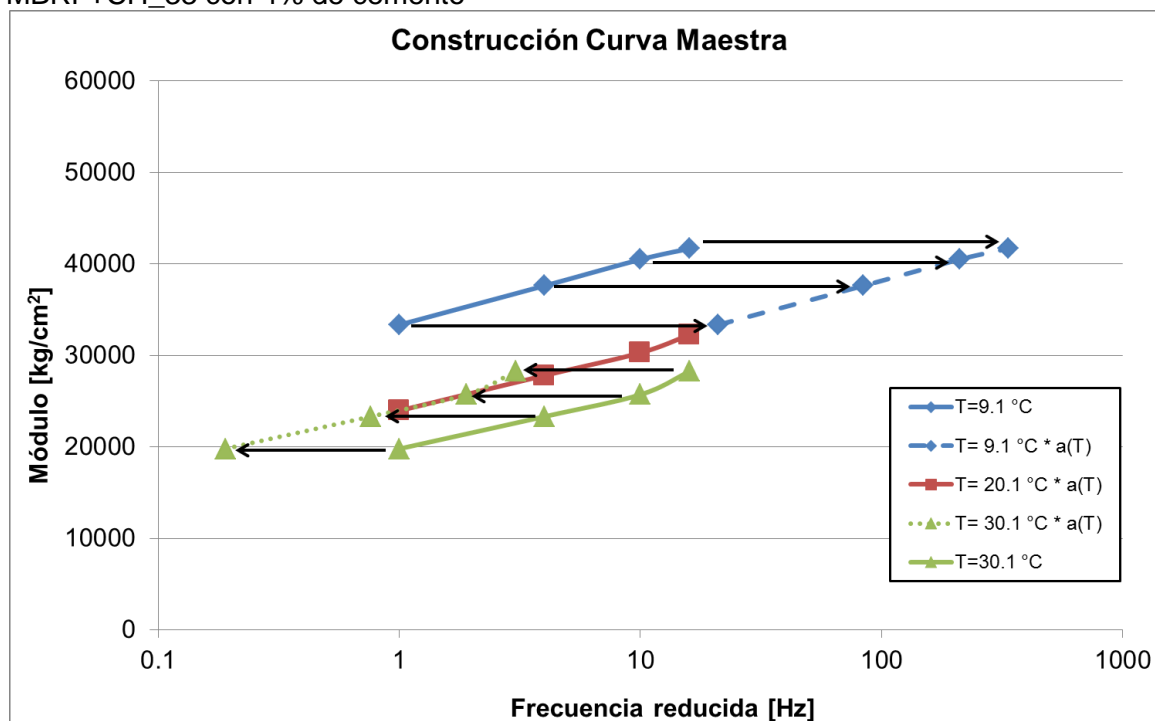
Utilizando la metodología descrita por Witczak (2004), mediante la cual se emplea el principio de superposición tiempo-temperatura y considerando los valores correspondientes al módulo de la mezcla ensayada en función de la frecuencia para tres temperaturas diferentes, se procedió a encontrar los factores de translación, que permitieron mover los valores de modulo para las temperaturas de interés (en este caso 9.1 y 30.1°C), definiendo como temperatura de referencia T= 20.1 °C.

Considerando que es más común construir las curvas maestras del Módulo Dinámico en el dominio de la frecuencia, en la Figura 39 se presenta el procedimiento de construcción de la curva maestra mediante la traslación de los valores de Módulo de temperaturas específicas (9.1°C y 30.1°C), con respecto a la definida como de referencia (20.1°C). Los factores de traslación o “*shift factor*” $a(T)$ se presentan en la Tabla 45.

Tabla 45: Factores de traslación para la mezcla MBRF+CH_33 con 4% de cemento

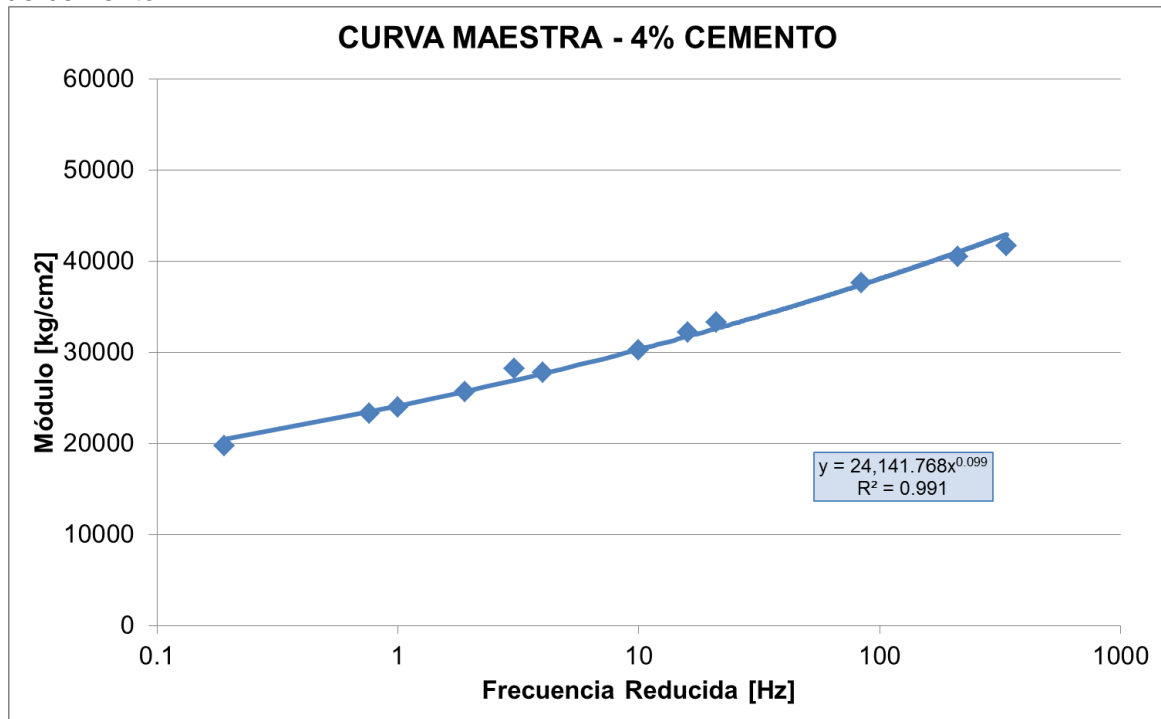
Temperatura [°C]	$a(T)$
9.1	21
20.1	1
30.1	0.19

Figura 39: Construcción de la curva maestra del Módulo Dinámico para la mezcla MBRF+CH_33 con 4% de cemento



Posteriormente se trazó una línea de tendencia potencial para los valores de módulo en función de la frecuencia reducida. Se considera que los resultados obtenidos son satisfactorios ya que se encuentran definidos por un coeficiente de determinación muy cercano a 1 (R^2), tal como se presenta en la Figura 40.

Figura 40: Curva maestra del Módulo Dinámico para la mezcla MBRF+CH_33 con 4% de cemento



Con respecto al ajuste de los valores encontrados para los factores de traslación de cada temperatura, se empleó el modelo William-Landel-Ferry (WLF), comúnmente utilizado para la elaboración de curvas maestras y cuya formulación se muestra en la Ecuación 33.

$$\log(a_T) = -\frac{C_1(T - T_R)}{C_2 + T - T_R} \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde C_1 y C_2 son constantes del modelo de ajuste WLF, T_R es la temperatura de referencia y T es la temperatura deseada.

La determinación de las constantes C_1 y C_2 se realizó mediante iteraciones, considerando como criterio de minimización de errores, la raíz cuadrada de la suma de las diferencias al cuadrado para cada temperatura, como lo describe la Ecuación 34.

$$\text{Error cuadrado} = \sum_{i=1}^n (A_{t_{\text{real}, T_i}} - A_{t_{\text{ajuste}, T_i}})^2 \quad \text{Ecuación 34}$$

La curva maestra proporciona el valor del módulo a la temperatura y frecuencia deseadas, pero es importante tener en cuenta que la ecuación de la curva debe tener como valor de entrada la frecuencia reducida, que se obtiene al multiplicar el valor de la frecuencia deseada por el factor de traslación o *shift factor*, obtenido a partir de las constantes calculadas previamente, la temperatura de referencia y la temperatura a la que se desea obtener el módulo. Para el caso de la mezcla MBRF+CH_33 con 4% de cemento $C1= 3.18$ y $C2= 37.44$.

La Tabla 46 presenta los valores para las constantes del modelo WLF, necesarias para encontrar los factores de traslación o *shift factor*, que finalmente son parámetros requeridos para el empleo de las curvas maestras.

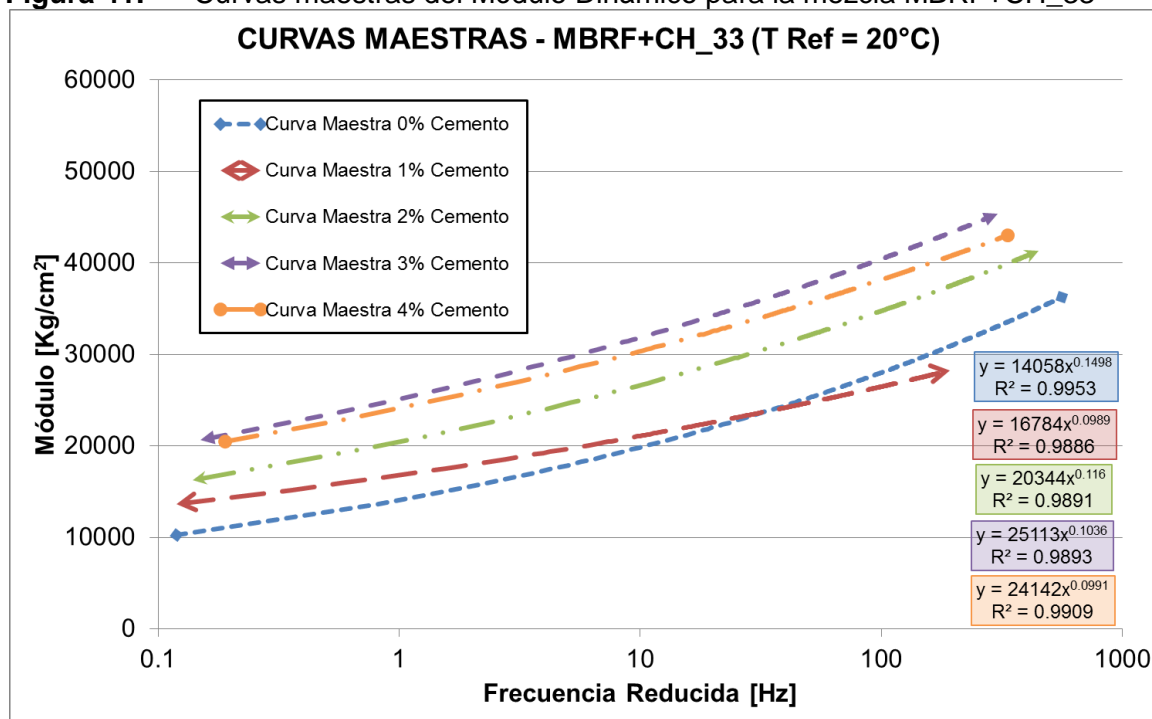
Tabla 46: Factores de ajuste WLF de la mezcla MBRF+CH_33

Cemento [%]	Constantes WLF	
	C1	C2
0	8.68	75.85
1	13.99	153.63
2	4.68	46.61
3	5.95	62.22
4	3.18	37.44

Finalmente en la Figura 41 se muestran las curvas maestras para la mezcla con los contenidos de cemento de 0, 1, 2, 3 y 4. Estas curvas maestras se ajustaron con una ecuación de regresión de forma exponencial, teniendo en cuenta que los valores de R^2 son muy cercanos a 1 para este tipo de ajuste. La forma típica de las ecuaciones que describen el comportamiento de las curvas maestras se muestra en la Ecuación 35.


$$\text{Módulo [kg/cm}^2\text{]} = K * \text{frecuencia reducida [Hz]}^N \quad \text{Ecuación 35}$$

Así mismo la Tabla 47 resume las constantes de la ecuación de forma potencial, K y N para la expresión de módulo para cada mezcla con adición de cemento distinta.

Figura 41: Curvas maestras del Módulo Dinámico para la mezcla MBRF+CH_33**Tabla 47:** Constantes de las ecuaciones de curvas maestras

Cemento [%]	K	N
0	14058	0.1498
1	16784	0.0989
2	20344	0.1160
3	25113	0.1036
4	24142	0.0991

En términos de lo descrito anteriormente, a continuación se presentan los valores de frecuencia reducida y Módulo Dinámico para distintos valores de temperatura y frecuencia en el dominio de los rangos manejados en los ensayos de laboratorio. Lo anterior para las curvas maestras de la mezcla con los distintos contenidos de cemento.

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA			
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS			 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
ENSAYO DE MODULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS (INV E-754) - VALORES DE MÓDULO OBTENIDOS A PARTIR DE LAS CURVAS MAESTRAS			

MEZCLA	MBRF+CH_33	Componentes	3% Agua	0% Cemento
BRIQUETA	MD33-0	Ecuación	Módulo = $14058 * (Frecuencia Reducida)^{0.1498}$	

Valores de ajuste para la ecuación WLF		$Log(aT) = -\frac{C_1 * (T - T_R)}{C_2 + (T - T_R)}$		
C1	8.68	C2	72.85	Temperatura de Referencia [C°]
				20.1

Temperatura [C°]		9
aT		36.34
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	36.34	24081
2	72.68	26716
3	109.02	28389
4	145.37	29639
5	181.71	30646
6	218.05	31495
7	254.39	32231
8	290.73	32882
9	327.07	33467
10	363.42	33999
11	399.76	34488
12	436.10	34941
13	472.44	35362
14	508.78	35757
15	545.12	36129
16	581.47	36480


Temperatura [C°]		14
aT		6.21
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	6.21	18482
2	12.43	20505
3	18.64	21789
4	24.85	22748
5	31.06	23521
6	37.28	24173
7	43.49	24737
8	49.70	25237
9	55.91	25686
10	62.13	26095
11	68.34	26470
12	74.55	26818
13	80.77	27141
14	86.98	27444
15	93.19	27729
16	99.40	27998

Temperatura [C°]		18
aT		1.81
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	1.81	15365
2	3.62	17046
3	5.43	18113
4	7.24	18911
5	9.05	19554
6	10.86	20095
7	12.67	20564
8	14.48	20980
9	16.29	21353
10	18.10	21693
11	19.91	22005
12	21.72	22294
13	23.53	22563
14	25.34	22814
15	27.15	23051
16	28.96	23275

Temperatura [C°]		22
aT		0.60
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	0.60	13028
2	1.20	14453
3	1.81	15358
4	2.41	16035
5	3.01	16580
6	3.61	17039
7	4.21	17437
8	4.81	17789
9	5.42	18106
10	6.02	18394
11	6.62	18658
12	7.22	18903
13	7.82	19131
14	8.42	19345
15	9.03	19546
16	9.63	19736

Temperatura [C°]		26
aT		0.22
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	0.22	11233
2	0.45	12462
3	0.67	13243
4	0.89	13826
5	1.12	14296
6	1.34	14692
7	1.57	15035
8	1.79	15339
9	2.01	15612
10	2.24	15860
11	2.46	16088
12	2.68	16299
13	2.91	16496
14	3.13	16680
15	3.36	16853
16	3.58	17017

Temperatura [C°]		30
aT		0.09
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	0.09	9826
2	0.18	10901
3	0.27	11583
4	0.37	12093
5	0.46	12504
6	0.55	12851
7	0.64	13151
8	0.73	13416
9	0.82	13655
10	0.92	13873
11	1.01	14072
12	1.10	14257
13	1.19	14429
14	1.28	14590
15	1.37	14741
16	1.46	14884

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS		
ENSAYO DE MODULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS (INV E-754) - VALORES DE MÓDULO OBTENIDOS A PARTIR DE LAS CURVAS MAESTRAS		

MEZCLA	MBRF+CH_33	Componentes	3% Agua	1% Cemento
BRIQUETA	MD33-1	Ecuación	Módulo = $16784 * (Frecuencia Reducida)^{0.0989}$	

Valores de ajuste para la ecuación WLF		$Log(aT) = -\frac{C_1 * (T - T_R)}{C_2 + (T - T_R)}$		
C1	13.99	C2	153.63	Temperatura de Referencia [C°]
				20.1

Temperatura [C°]		9
aT		12.29
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	12.29	21510
2	24.58	23037
3	36.87	23979
4	49.16	24671
5	61.45	25222
6	73.73	25681
7	86.02	26075
8	98.31	26422
9	110.60	26732
10	122.89	27012
11	135.18	27267
12	147.47	27503
13	159.76	27722
14	172.05	27925
15	184.34	28117
16	196.62	28297


Temperatura [C°]		14
aT		3.79
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	3.79	19147
2	7.58	20506
3	11.37	21345
4	15.15	21961
5	18.94	22451
6	22.73	22859
7	26.52	23211
8	30.31	23519
9	34.10	23795
10	37.88	24044
11	41.67	24272
12	45.46	24481
13	49.25	24676
14	53.04	24857
15	56.83	25028
16	60.61	25188

Temperatura [C°]		18
aT		1.56
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	1.56	17542
2	3.13	18786
3	4.69	19555
4	6.25	20119
5	7.81	20568
6	9.38	20943
7	10.94	21264
8	12.50	21547
9	14.06	21799
10	15.63	22028
11	17.19	22236
12	18.75	22429
13	20.32	22607
14	21.88	22773
15	23.44	22929
16	25.00	23076

Temperatura [C°]		22
aT		0.67
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	0.67	16143
2	1.35	17289
3	2.02	17996
4	2.70	18516
5	3.37	18929
6	4.05	19273
7	4.72	19569
8	5.40	19829
9	6.07	20062
10	6.75	20272
11	7.42	20464
12	8.10	20641
13	8.77	20805
14	9.45	20958
15	10.12	21101
16	10.79	21236

Temperatura [C°]		26
aT		0.30
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	0.30	14918
2	0.61	15977
3	0.91	16631
4	1.22	17111
5	1.52	17493
6	1.82	17811
7	2.13	18084
8	2.43	18325
9	2.73	18540
10	3.04	18734
11	3.34	18911
12	3.65	19075
13	3.95	19226
14	4.25	19368
15	4.56	19500
16	4.86	19625

Temperatura [C°]		30
aT		0.14
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	0.14	13840
2	0.28	14822
3	0.43	15428
4	0.57	15874
5	0.71	16228
6	0.85	16523
7	1.00	16777
8	1.14	17000
9	1.28	17199
10	1.42	17379
11	1.56	17544
12	1.71	17696
13	1.85	17836
14	1.99	17967
15	2.13	18090
16	2.28	18206

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS		
ENSAYO DE MODULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS (INV E-754) - VALORES DE MÓDULO OBTENIDOS A PARTIR DE LAS CURVAS MAESTRAS		

MEZCLA	MBRF+CH_33	Componentes	3% Agua	2% Cemento
BRIQUETA	MD33-2	Ecuación	Módulo = $20344 * (Frecuencia Reducida)^{0.116}$	

Valores de ajuste para la ecuación WLF		$Log(aT) = - \frac{C_1 * (T - T_R)}{C_2 + (T - T_R)}$		
C1	4.68	C2	46.61	Temperatura de Referencia [C°]
				20.1

Temperatura [C°]		9
aT		29.03
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	29.03	30070
2	58.07	32588
3	87.10	34157
4	116.14	35316
5	145.17	36242
6	174.21	37017
7	203.24	37685
8	232.27	38273
9	261.31	38800
10	290.34	39277
11	319.38	39713
12	348.41	40116
13	377.45	40490
14	406.48	40840
15	435.51	41168
16	464.55	41477


Temperatura [C°]		14
aT		5.07
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	5.07	24557
2	10.13	26614
3	15.20	27895
4	20.27	28842
5	25.33	29598
6	30.40	30231
7	35.47	30776
8	40.53	31257
9	45.60	31687
10	50.67	32076
11	55.73	32433
12	60.80	32762
13	65.87	33067
14	70.93	33353
15	76.00	33621
16	81.07	33874

Temperatura [C°]		18
aT		1.66
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	1.66	21580
2	3.33	23387
3	4.99	24513
4	6.65	25345
5	8.31	26009
6	9.98	26565
7	11.64	27045
8	13.30	27467
9	14.96	27845
10	16.63	28187
11	18.29	28500
12	19.95	28790
13	21.61	29058
14	23.28	29309
15	24.94	29544
16	26.60	29766

Temperatura [C°]		22
aT		0.66
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	0.66	19372
2	1.31	20994
3	1.97	22005
4	2.62	22752
5	3.28	23348
6	3.93	23847
7	4.59	24278
8	5.25	24657
9	5.90	24996
10	6.56	25303
11	7.21	25584
12	7.87	25844
13	8.52	26085
14	9.18	26310
15	9.84	26522
16	10.49	26721

Temperatura [C°]		26
aT		0.30
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	0.30	17678
2	0.60	19158
3	0.89	20081
4	1.19	20762
5	1.49	21307
6	1.79	21762
7	2.09	22155
8	2.38	22501
9	2.68	22810
10	2.98	23091
11	3.28	23347
12	3.58	23584
13	3.87	23804
14	4.17	24010
15	4.47	24203
16	4.77	24385

Temperatura [C°]		30
aT		0.15
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	0.15	16343
2	0.30	17711
3	0.45	18564
4	0.61	19194
5	0.76	19697
6	0.91	20118
7	1.06	20481
8	1.21	20801
9	1.36	21087
10	1.51	21347
11	1.67	21584
12	1.82	21803
13	1.97	22006
14	2.12	22196
15	2.27	22375
16	2.42	22543

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS		
ENSAYO DE MODULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS (INV E-754) - VALORES DE MÓDULO OBTENIDOS A PARTIR DE LAS CURVAS MAESTRAS		

MEZCLA	MBRF+CH_33	Componentes	3% Agua	3% Cemento
BRIQUETA	MD33-3	Ecuación	Módulo = $25113 * (Frecuencia Reducida)^{0.1036}$	

Valores de ajuste para la ecuación WLF		$Log(aT) = -\frac{C_1 * (T - T_R)}{C_2 + (T - T_R)}$		
C1	5.95	C2	62.22	Temperatura de Referencia [C°]
				20.1

Temperatura [C°]		9
aT		19.59
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	19.59	34178
2	39.17	36723
3	58.76	38298
4	78.35	39457
5	97.93	40379
6	117.52	41149
7	137.11	41812
8	156.69	42394
9	176.28	42915
10	195.87	43386
11	215.45	43816
12	235.04	44213
13	254.63	44581
14	274.21	44925
15	293.80	45247
16	313.39	45550


Temperatura [C°]		14
aT		4.43
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	4.43	29302
2	8.87	31484
3	13.30	32835
4	17.73	33828
5	22.17	34619
6	26.60	35279
7	31.03	35847
8	35.47	36346
9	39.90	36793
10	44.33	37196
11	48.77	37565
12	53.20	37906
13	57.63	38221
14	62.07	38516
15	66.50	38792
16	70.93	39052

Temperatura [C°]		18
aT		1.61
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	1.61	26389
2	3.23	28354
3	4.84	29571
4	6.45	30465
5	8.07	31178
6	9.68	31772
7	11.30	32284
8	12.91	32733
9	14.52	33135
10	16.14	33499
11	17.75	33831
12	19.36	34138
13	20.98	34422
14	22.59	34687
15	24.21	34936
16	25.82	35170

Temperatura [C°]		22
aT		0.67
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	0.67	24079
2	1.33	25871
3	2.00	26981
4	2.67	27798
5	3.33	28448
6	4.00	28990
7	4.66	29457
8	5.33	29867
9	6.00	30234
10	6.66	30566
11	7.33	30869
12	8.00	31148
13	8.66	31408
14	9.33	31650
15	9.99	31877
16	10.66	32091

Temperatura [C°]		26
aT		0.31
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	0.31	22208
2	0.61	23861
3	0.92	24885
4	1.22	25638
5	1.53	26238
6	1.83	26738
7	2.14	27168
8	2.44	27547
9	2.75	27885
10	3.05	28191
11	3.36	28471
12	3.66	28728
13	3.97	28968
14	4.27	29191
15	4.58	29400
16	4.88	29598

Temperatura [C°]		30
aT		0.15
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	0.15	20667
2	0.30	22206
3	0.46	23159
4	0.61	23859
5	0.76	24417
6	0.91	24883
7	1.07	25283
8	1.22	25636
9	1.37	25950
10	1.52	26235
11	1.68	26495
12	1.83	26735
13	1.98	26958
14	2.13	27166
15	2.29	27361
16	2.44	27544

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS		
ENSAYO DE MODULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS (INV E-754) - VALORES DE MÓDULO OBTENIDOS A PARTIR DE LAS CURVAS MAESTRAS		

MEZCLA	MBRF+CH_33	Componentes	3% Agua	4% Cemento
BRIQUETA	MD33-4	Ecuación	Módulo = 24142 * (Frecuencia Reducida) ^{0.0991}	

Valores de ajuste para la ecuación WLF		$\text{Log}(aT) = -\frac{C_1 * (T - T_R)}{C_2 + (T - T_R)}$		
C1	3.18	C2	37.44	Temperatura de Referencia [C°]
				20.1

Temperatura [C°]		9
aT		21.88
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	21.88	32778
2	43.76	35108
3	65.65	36548
4	87.53	37605
5	109.41	38445
6	131.29	39146
7	153.18	39749
8	175.06	40278
9	196.94	40751
10	218.82	41179
11	240.70	41570
12	262.59	41930
13	284.47	42264
14	306.35	42575
15	328.23	42867
16	350.12	43142

Temperatura [C°]		14
aT		4.16
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	4.16	27804
2	8.32	29781
3	12.48	31002
4	16.63	31899
5	20.79	32612
6	24.95	33207
7	29.11	33718
8	33.27	34167
9	37.43	34568
10	41.59	34931
11	45.75	35263
12	49.90	35568
13	54.06	35851
14	58.22	36115
15	62.38	36363
16	66.54	36597


Temperatura [C°]		18
aT		1.55
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	1.55	25206
2	3.09	26998
3	4.64	28105
4	6.18	28918
5	7.73	29564
6	9.27	30103
7	10.82	30567
8	12.36	30974
9	13.91	31338
10	15.45	31666
11	17.00	31967
12	18.54	32244
13	20.09	32501
14	21.63	32740
15	23.18	32965
16	24.72	33176


Temperatura [C°]		22
aT		0.70
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	0.70	23311
2	1.40	24968
3	2.11	25992
4	2.81	26743
5	3.51	27341
6	4.21	27840
7	4.91	28268
8	5.62	28645
9	6.32	28981
10	7.02	29286
11	7.72	29563
12	8.43	29819
13	9.13	30057
14	9.83	30278
15	10.53	30486
16	11.23	30682

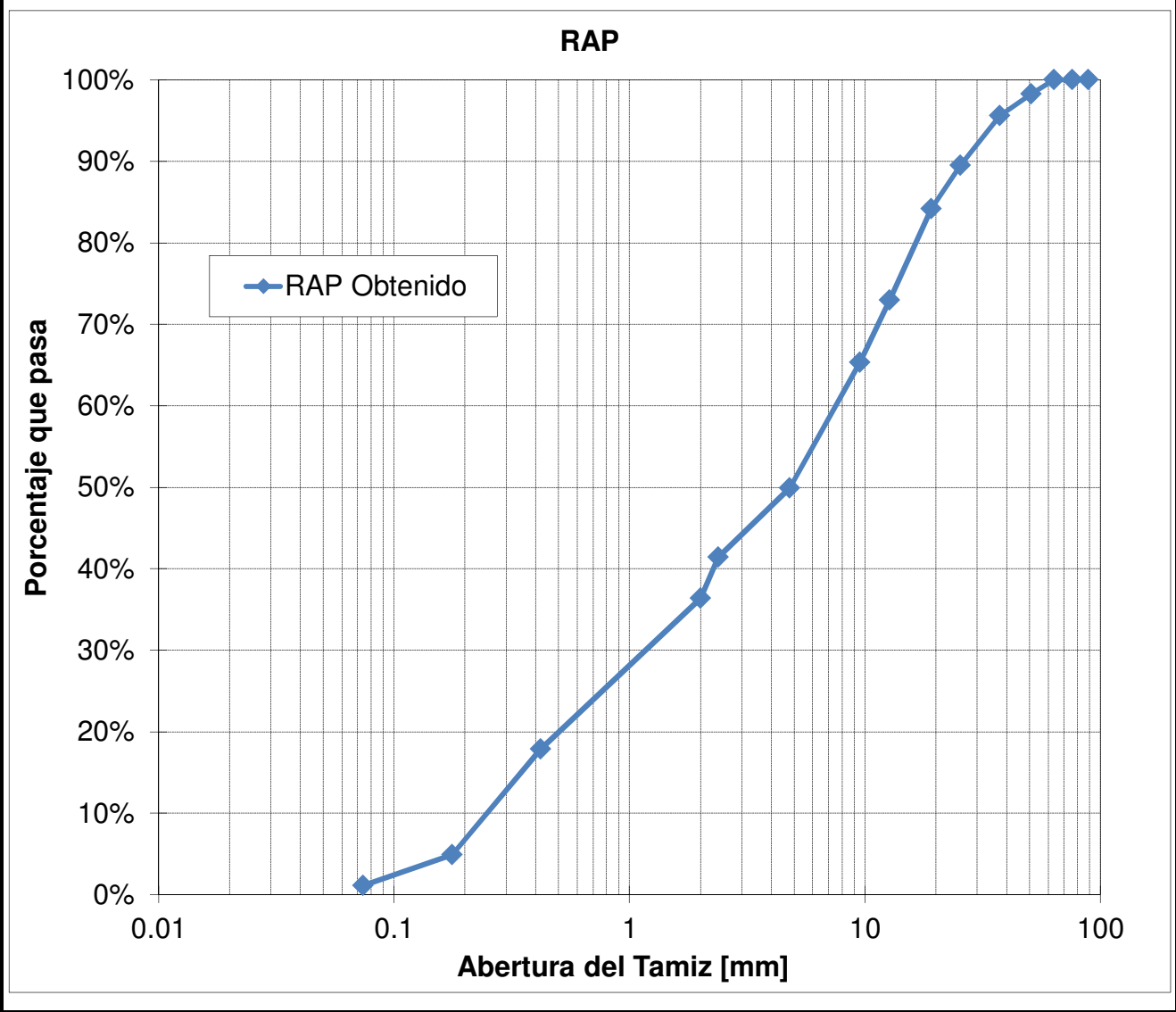
Temperatura [C°]		26
aT		0.37
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	0.37	21871
2	0.74	23426
3	1.11	24387
4	1.48	25092
5	1.85	25653
6	2.21	26121
7	2.58	26523
8	2.95	26876
9	3.32	27192
10	3.69	27477
11	4.06	27738
12	4.43	27978
13	4.80	28201
14	5.17	28409
15	5.54	28604
16	5.90	28787

Temperatura [C°]		30
aT		0.22
Frecuencia [Hz]	Frecuencia Reducida [Hz]	Módulo [Kg/cm²]
1	0.22	20743
2	0.43	22218
3	0.65	23129
4	0.87	23798
5	1.08	24330
6	1.30	24773
7	1.51	25155
8	1.73	25490
9	1.95	25789
10	2.16	26060
11	2.38	26307
12	2.60	26535
13	2.81	26746
14	3.03	26943
15	3.24	27128
16	3.46	27302

D. Anexo: Resultados de ensayos de laboratorio

TRABAJO FINAL DE MAESTRIA - MAESTRIA EN INGENIERIA GEOTECNIA						 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA										
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS																
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE MATERIAL FRESADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO I.N.V.E. 213																
Tamiz	Abertura del tamiz [mm]	Peso retenido [gr]	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa	<table><tr><th>TAMAÑO MÁXIMO</th><th>3"</th></tr><tr><td>PORCENTAJE DE GRAVAS</td><td>50.1%</td></tr><tr><td>PORCENTAJE DE ARENAS</td><td>48.8%</td></tr><tr><td>PORCENTAJE DE FINOS</td><td>1.1%</td></tr><tr><td>TOTAL</td><td>100.0%</td></tr></table>	TAMAÑO MÁXIMO	3"	PORCENTAJE DE GRAVAS	50.1%	PORCENTAJE DE ARENAS	48.8%	PORCENTAJE DE FINOS	1.1%	TOTAL	100.0%
TAMAÑO MÁXIMO	3"															
PORCENTAJE DE GRAVAS	50.1%															
PORCENTAJE DE ARENAS	48.8%															
PORCENTAJE DE FINOS	1.1%															
TOTAL	100.0%															
3 1/2"	88.9	0.0	0%	0%	100%											
3"	76.2	0.0	0%	0%	100%											
2 1/2"	63.5	0.0	0%	0%	100%											
2"	50.8	126.7	2%	2%	98%											
1 1/2"	37.5	197.7	3%	4%	96%											
1"	25.4	450.1	6%	10%	90%											
3/4"	19.1	395.5	5%	16%	84%											
1/2"	12.7	833.7	11%	27%	73%											
3/8"	9.5	565.2	8%	35%	65%											
No. 4	4.8	1139.3	15%	50%	50%											
No. 8	2.38	629.7	9%	59%	41%											
No. 10	2.00	373.8	5%	64%	36%											
No. 40	0.42	1373.8	19%	82%	18%											
No. 80	0.177	959.4	13%	95%	5%											
No. 200	0.074	281.0	4%	99%	1%											
Fondo		80.8	1%	100%	0%											
PESO TOTAL [gr]		7406.7	100%													





TRABAJO FINAL DE MAESTRIA - MAESTRIA EN INGENIERIA GEOTECNIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO
RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE MATERIAL FRESADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO I.N.V.E. 213
AJUSTE A LA GRANULOMETRÍA ADMISIBLE PARA RECICLAJE DE PAVIMENTO ASFÁLTICO - ESPECIFICACIÓN IDU-ET-2011-450-05

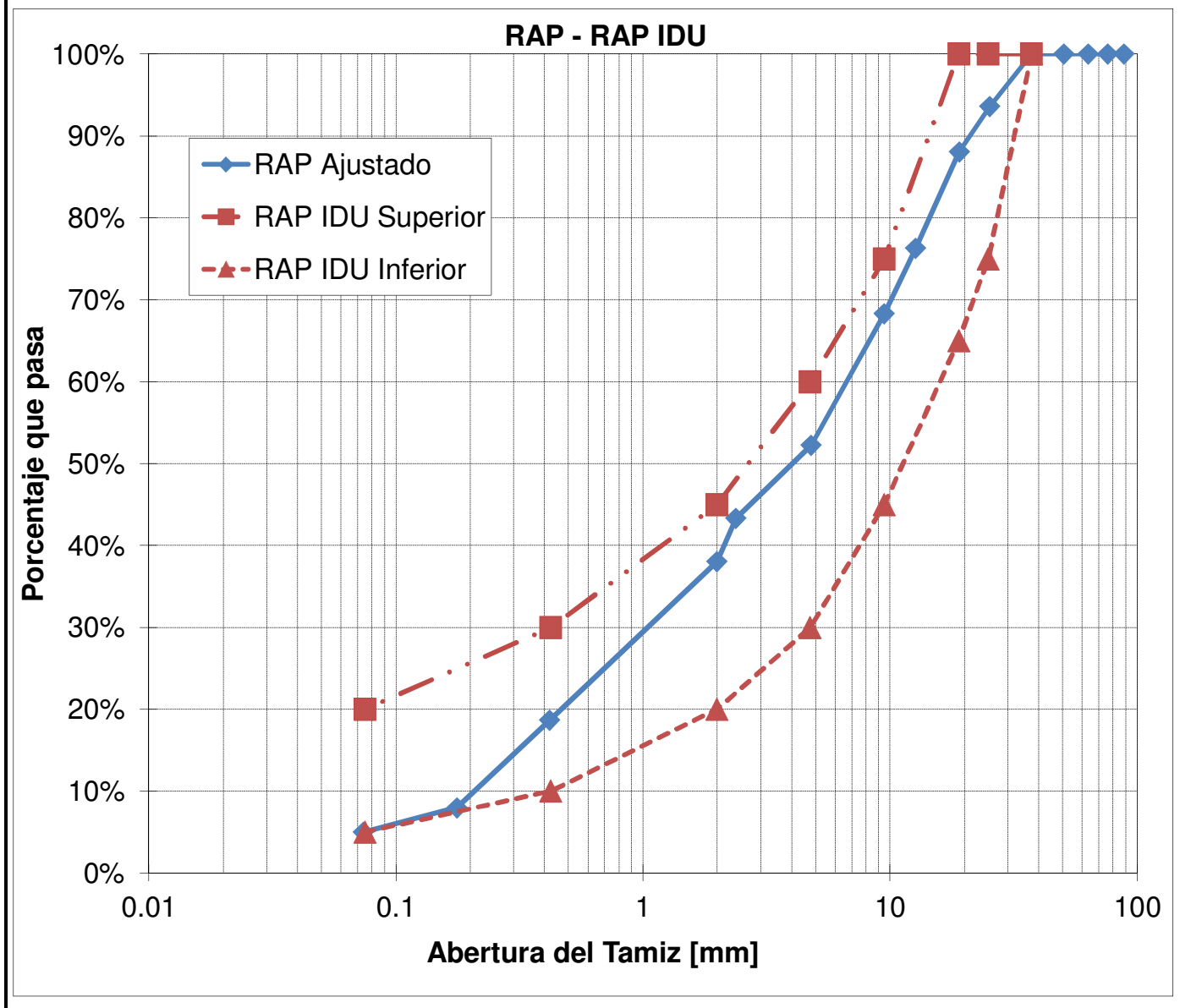



Tamiz	Abertura del tamiz [mm]	Peso retenido [gr]	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
3 1/2"	88.9	0.0	0%	0%	100%
3"	76.2	0.0	0%	0%	100%
2 1/2"	63.5	0.0	0%	0%	100%
2"	50.8	0.0	0%	0%	100%
1 1/2"	37.5	0.0	0%	0%	100%
1"	25.4	450.1	6%	6%	94%
3/4"	19.1	395.5	6%	12%	88%
1/2"	12.7	833.7	12%	24%	76%
3/8"	9.5	565.2	8%	32%	68%
No. 4	4.8	1139.3	16%	48%	52%
No. 8	2.38	629.7	9%	57%	43%
No. 10	2.00	373.8	5%	62%	38%
No. 40	0.42	1373.8	19%	81%	19%
No. 80	0.177	959.4	14%	95%	8%
No. 200	0.074	281.0	4%	99%	5%
Fondo		80.8	1%	100%	
PESO TOTAL grs.		7082.3	100%		

RAP - % PASA		Tamiz	Abertura del tamiz [mm]
RAP IDU Superior	RAP IDU Inferior		
100%	100%	1 1/2"	37.5
100%	75%	1"	25
100%	65%	3/4"	19
75%	45%	3/8"	9.5
60%	30%	#4	4.75
45%	20%	#10	2.00
30%	10%	#40	0.425
20%	5%	#200	0.075

Tabla 450.1
Granulometría admisible para reciclaje de pavimento asfáltico

mm	Tamiz U.S. Standard	Porcentaje que Pasa
37.5 mm	1 1/2"	100
25.0 mm	1"	75-100
19.0 mm	3/4"	65-100
9.5 mm	3/8"	45-75
4.75 mm	No. 4	30-60
2.00 mm	No. 10	20-45
425 µm	No. 40	10-30
75 µm	No. 200	5-20



TRABAJO FINAL DE MAESTRIA - MAESTRIA EN INGENIERIA GEOTECNIA		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECANICO DE MEZCLAS ASFALTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS		
CONTENIDO DE HUMEDAD DEL RAP (INV E-122)		

JULIO 10 DE 2013

		Winicial RAP+PLATON	W Platon	W RAP inicial
MUESTRA 1		1019.65	161.92	857.73
MUESTRA 2		1110.33	178.5	931.83
MUESTRA 3		1135	177.02	957.98

SE INTRODUIERON LAS MUESTRAS A UN HORNO CON TEMPERATURA CONSTANTE DE 60 °C

JULIO 16 DE 2013

		W RAP+PLATON	W Platon	W RAP inicial
MUESTRA 1		1016.45	161.92	854.53
MUESTRA 2		1107.03	178.5	928.53
MUESTRA 3		1131.66	177.02	954.64

SE PESÓ EL MATERIAL DESPUES DE SOMETERLO AL CALOR DEL HORNO DURANTE 6 DIAS Y SE INTRODUJO EL MATERIAL NUEVAMENTE AL HORNO

JULIO 18 DE 2013


		W RAP+PLATON	W Platon	W RAP inicial
MUESTRA 1		1016.44	161.92	854.52
MUESTRA 2		1107.03	178.5	928.53
MUESTRA 3		1131.66	177.02	954.64

DESPUES DE 8 DIAS EN EL HORNO SE OBTUVO UN PESO CONSTANTE

MUESTRA 1	W _n =	$\frac{W_w}{W_s}$	=	$\frac{3.21}{854.52}$	=	0.38%
MUESTRA 2	W _n =	$\frac{W_w}{W_s}$	=	$\frac{3.30}{928.53}$	=	0.36%
MUESTRA 3	W _n =	$\frac{W_w}{W_s}$	=	$\frac{3.34}{954.64}$	=	0.35%

**HUMEDAD NATURAL
PROMEDIO**

0.36%

TRABAJO FINAL DE MAESTRIA - MAESTRIA EN INGENIERIA GEOTECNIA				 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFALTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS				
INDICE DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO (INV E-230)				
Indice de Alargamiento				
Masa de la muestra Mo [gr]	2972.34	Masa retenida por el tamiz 75 mm [gr]	0	
		Masa que pasa por el tamiz 4.75 mm [gr]	1622.67	
		Suma de las masas rechazadas [gr]	1622.67	
Fracción granulométrica di / Di mm - plg	Masa (Ri) de la fracción granulométrica di / Di gr	Ancho nominal de los tamices de barras mm	Masa que pasa por el tamiz de barras (mi) gr	ILi = (mi/Ri) x 100
63 / 50 - 2 1/2" - 2"	0	33.9	0	
50 / 37.5 - 2" - 1 1/2"	0	26.3	0	
37.5 / 25 - 1 1/2" - 1"	149.14	18.8	129.05	86.53%
25 / 19 - 1" - 3/4"	118.81	13.2	57.89	48.72%
19 / 12.5 - 3/4" - 1/2"	339.37	9.5	258.11	76.06%
12.5 / 9.5 - 1/2" - 3/8"	302.31	6.6	200.7	66.39%
9.5 / 6.3 - 3/8" - 1/4"	436.5	4.7	368.74	84.48%
M1 = ΣRi = [gr]	1346.13	M2 = ΣRi = [gr]	1014.49	
IL = (M2/M1) x 100				75.36%
$100 \times \frac{M_o - \left\{ \sum R_i + \sum (masas rechazadas) \right\}}{M_o} =$			0.12%	<1%
Indice de Aplanamiento				
Masa de la muestra Mo [gr]	2972.34	Masa retenida por el tamiz 75 mm [gr]	0	
		Masa que pasa por el tamiz 4.75 mm [gr]	1622.67	
		Suma de las masas rechazadas [gr]	1622.67	
Fracción granulométrica di / Di mm - plg	Masa (Ri) de la fracción granulométrica di / Di gr	Ancho nominal de los tamices de barras mm	Masa que pasa por el tamiz de barras (mi) gr	IAi = (mi/Ri) x 100
63 / 50 - 2 1/2" - 2"	0	33.9	0	
50 / 37.5 - 2" - 1 1/2"	0	26.3	0	
37.5 / 25 - 1 1/2" - 1"	149.14	18.8	0	0.00%
25 / 19 - 1" - 3/4"	118.81	13.2	70.41	59.26%
19 / 12.5 - 3/4" - 1/2"	339.37	9.5	184.65	54.41%
12.5 / 9.5 - 1/2" - 3/8"	302.31	6.6	98.64	32.63%
9.5 / 6.3 - 3/8" - 1/4"	436.5	4.7	42.29	9.69%
M1 = ΣRi = [gr]	1346.13	M2 = ΣRi = [gr]	395.99	
IA = (M2/M1) x 100				29.42%
$100 \times \frac{M_o - \left\{ \sum R_i + \sum (masas rechazadas) \right\}}{M_o} =$			0.12%	<1%

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA					
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS					
PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS EN LOS AGREGADOS (INV E-227)					



NÚMERO ESPECIFICADO DE CARAS FRACTURADAS: A PARTIR DE UNA CARA

Tamiz		Peso porción de ensayo	Peso de partículas fracturadas	Peso de partículas no fracturadas	Peso de partículas en la categoría cuestionable	Porcentaje de partículas con el número especificado de caras fracturadas
Pasa	Retiene	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]
Tamaño máximo de la muestra: 1 1/2"	3/8"	2879.0	2849.2	13.0	16.8	99
3/8"	No.4	223.5	217.7	5.8		97
			% DE CARAS FRACTURADAS POR MASA A PARTIR DE UNA CARA		99	

NÚMERO ESPECIFICADO DE CARAS FRACTURADAS: A PARTIR DE DOS CARAS

Tamaño máximo de la muestra: 1 1/2"	3/8"	2879.0	2815.0	56.2	7.8	98
3/8"	No.4	223.5	215.0	8.5		96
			% DE CARAS FRACTURADAS POR MASA A PARTIR DE DOS CARAS		98	


A= Masa porción de ensayo. [g]

F= Masa de partículas fracturadas con dos o mas caras fracturadas.[g]

N= Masa de partículas que no cumplen el criterio de partículas fracturadas.[g]

Q= Masa de partículas en la categoría cuestionable o frontera.[g]


PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS = $[(F+Q/2)/(F+Q+N)] \times 100$

TRABAJO FINAL DE MAESTRIA - MAESTRIA EN INGENIERIA GEOTECNIA	 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS	
RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 37,5mm (1 1/2") POR MEDIO DE LA MAQUINA DE LOS ANGELES (I.N.V. E-218)	

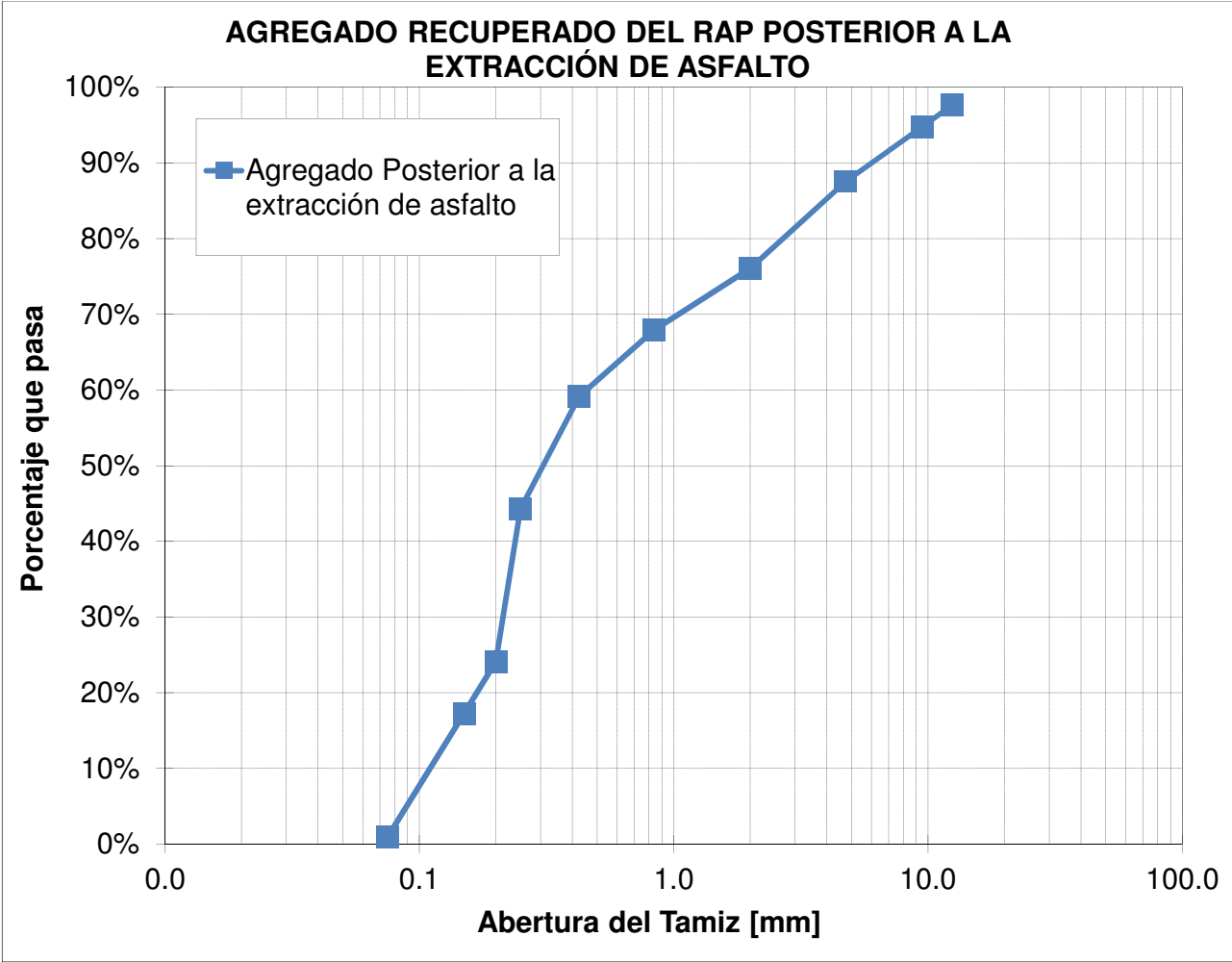
Prueba	En seco 500Rev
Gradación usada	B
No. De esferas	11
No. De revoluciones	500
Masa muestra seca inicial de ensayo (g)	5003
Masa muestra seca despues del ensayo (g)	2437.2
PORCENTAJE DESGASTE (%)	51%


Tabla 2. (norma I.N.V. E-218/07) Granulometrías de la muestra de agregado para ensayo


Tamices		Masa de la muestra para ensayo (g) Granulometrías			
Pasa	Retenido	A	B	C	D
1 1/2" (37,5mm)	1" (25,0mm)	1250±25			
1" (25,0mm)	3/4" (19,0mm)	1250±25			
3/4" (19,0mm)	1/2" (12,5 mm)	1250±10	2500±10		
1/2" (12,5 mm)	3/8" (9,5 mm)	1250±10	2500±10		
3/8" (9,5 mm)	1/4" (6,3 mm)			2500±10	
1/4" (6,3 mm)	No. 4 (4,75 mm)			2500±10	
No. 4 (4,75 mm)	No. 8 (2,36 mm)				5000±10
No. de esferas		12	11	8	6
No. de revoluciones		500	500	500	500


TRABAJO FINAL DE MAESTRIA - MAESTRIA EN INGENIERIA GEOTECNIA		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFALTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS		
PESO ESPECÍFICO (INV E-222/223)		
PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS (INV E-223)		
DESCRIPCION	Promedio	
Peso al aire material S.S.S. [g] (B)	1344.0	
Peso sumergida en agua de la muestra saturada(C)	698.5	
Peso seca al aire después de sumergida (A)	1319.9	
Agua Absorbida (B-A)	24.1	
Volumen muestra saturada (B-C)	645.5	
Volumen de sólidos (A-C)	621.4	
Gravedad específica bulk (Gsb), 23 °C/23 °C	2.045	
Gravedad específica bulk sss (Gsb sss), 23 °C/23 °C	2.082	
Gravedad específica aparente (Gsa), 23 °C/23 °C	2.124	
Absorción % [(B-A)/A]*100	1.8	
GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS (INV E-222/07)		
DESCRIPCION	Promedio	
Temperatura de ensayo	23.0	
Peso material S.S.S. [g] (S)	500.0	
Peso matraz + agua [g] (B)	662.6	
Peso matraz+muestra+agua [g] (C)	948.2	
Peso seca al aire [g] (A)	488.0	
Volumen de sólidos (B+A-C)	202.4	
Volumen muestra saturada (B+S-C)	214.4	
Gravedad específica bulk (Gsb), 23 °C/23 °C	2.276	
Gravedad específica bulk sss (Gsb sss), 23 °C/23 °C	2.332	
Gravedad específica aparente (Gsa), 23 °C/23 °C	2.411	
Absorción % [(B-A)/A]*100	2.5	


		TAMAÑO MAXIMO		1/2"		
		PORCENTAJE DE GRAVAS		12.4%		
		PORCENTAJE DE ARENAS		86.6%		
		PORCENTAJE DE FINOS		0.9%		
		TOTAL		100.0%		
Tamiz	Abertura del tamiz [mm]	Peso retenido [gr]	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa	
1/2"	12.5	21.7	2%	2%	98%	
3/8"	9.5	26.6	3%	5%	95%	
#4	4.75	67.3	7%	12%	88%	
#10	2.00	106.6	11%	24%	76%	
#20	0.84	75.8	8%	32%	68%	
#40	0.425	81.6	9%	41%	59%	
#60	0.25	138.4	15%	56%	44%	
#80	0.2	187.5	20%	76%	24%	
#100	0.15	63.3	7%	83%	17%	
#200	0.075	151.9	16%	99%	1%	
Pasa #200		8.5	1%			
PESO TOTAL grs.		929.1	100%			





TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS				
RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL (I.N.V. E-748/07), GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECIMENES SSS (I.N.V. E-733 / 07) MÉTODO A numeral 8,2), ANALISIS VOLUMETRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EN CALIENTE (I.N.V. E-799/07)				
MEZCLA	MBRF+CH_23	Componentes	2% Agua	0% Cemento
GMM	2.178	MSH23-0_1	MSH23-0_2	Promedio
Peso del espécimen seco en el aire [g]		1051.4	1046.9	1049
Peso al aire del espécimen SSS [g]		1053.4	1048.6	1051
Peso del especimen en agua [g]		507.2	507.8	508
Gravedad específica bulk a 25 °C		1.925	1.936	1.930
Densidad a 25 ° C [Kg/m³]		1919	1930	1925
Absorción [%]		0.366	0.314	0.340
Espesor Briqueta [mm]		67.3	66.0	66.7
Estabilidad medida [Kg]		1724	2023	1874
Flujo [mm]		4.3	4.1	4.2
Porcentaje de vacios de aire [%]		11.6	11.1	11.4


TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS				
RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL (I.N.V. E-748/07), GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECIMENES SSS (I.N.V. E-733 / 07) MÉTODO A numeral 8,2), ANALISIS VOLUMETRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EN CALIENTE (I.N.V. E-799/07)				
MEZCLA	MBRF+CH_23	Componentes	2% Agua	1% Cemento
GMM	2.178	MSH23-1_1	MSH23-1_2	Promedio
Peso del espécimen seco en el aire [g]		1048.3	1063.4	1056
Peso al aire del espécimen SSS [g]		1050.9	1065.1	1058
Peso del especimen en agua [g]		508.6	515.7	512
Gravedad específica bulk a 25 °C		1.933	1.936	1.934
Densidad a 25 ° C [Kg/m³]		1927	1930	1929
Absorción [%]		0.479	0.309	0.394
Espesor Briqueta [mm]		68.0	67.8	67.9
Estabilidad medida [Kg]		1954	2028	1991
Flujo [mm]		4.8	5.1	5.0
Porcentaje de vacios de aire [%]		11.2	11.1	11.2


TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS				
RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL (I.N.V. E-748/07), GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECIMENES SSS (I.N.V. E-733 / 07) MÉTODO A numeral 8,2), ANALISIS VOLUMETRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EN CALIENTE (I.N.V. E-799/07)				
MEZCLA	MBRF+CH_23	Componentes	2% Agua	2% Cemento
GMM	2.178	MSH23-2_1	MSH23-2_2	Promedio
Peso del espécimen seco en el aire [g]		1058.1	1068.6	1063
Peso al aire del espécimen SSS [g]		1060.3	1069.8	1065
Peso del especimen en agua [g]		519.2	518.0	519
Gravedad específica bulk a 25 °C		1.955	1.937	1.946
Densidad a 25 ° C [Kg/m³]		1950	1931	1940
Absorción [%]		0.407	0.217	0.312
Espesor Briqueta [mm]		67.7	69.8	68.8
Estabilidad medida [Kg]		2359	2681	2520
Flujo [mm]		5.1	4.8	5.0
Porcentaje de vacios de aire [%]		10.2	11.1	10.7


TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS				
RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL (I.N.V. E-748/07), GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECIMENES SSS (I.N.V. E-733 / 07) MÉTODO A numeral 8,2), ANALISIS VOLUMETRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EN CALIENTE (I.N.V. E-799/07)				
MEZCLA	MBRF+CH_23	Componentes	2% Agua	3% Cemento
GMM	2.178	MSH23-3_1	MSH23-3_2	Promedio
Peso del espécimen seco en el aire [g]		1064.4	1057.8	1061
Peso al aire del espécimen SSS [g]		1065.8	1060.3	1063
Peso del especimen en agua [g]		517.2	514.9	516
Gravedad específica bulk a 25 °C		1.940	1.939	1.940
Densidad a 25 ° C [Kg/m³]		1934	1934	1934
Absorción [%]		0.255	0.458	0.357
Espesor Briqueta [mm]		68.8	70.7	69.8
Estabilidad medida [Kg]		2056	2258	2157
Flujo [mm]		4.8	5.1	5.0
Porcentaje de vacios de aire [%]		10.9	11.0	10.9


TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS				
RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL (I.N.V. E-748/07), GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECIMENES SSS (I.N.V. E-733 / 07) MÉTODO A numeral 8,2), ANALISIS VOLUMETRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EN CALIENTE (I.N.V. E-799/07)				
MEZCLA	MBRF+CH_23	Componentes	2% Agua	4% Cemento
GMM	2.178	MSH23-4_1	MSH23-4_2	Promedio
Peso del espécimen seco en el aire [g]		1072.5	1073.4	1073
Peso al aire del espécimen SSS [g]		1074.0	1074.8	1074
Peso del especimen en agua [g]		524.8	520.6	523
Gravedad específica bulk a 25 °C		1.953	1.937	1.945
Densidad a 25 ° C [Kg/m³]		1947	1931	1939
Absorción [%]		0.273	0.253	0.263
Espesor Briqueta [mm]		69.4	69.7	69.6
Estabilidad medida [Kg]		3102	2906	3004
Flujo [mm]		4.8	5.1	5.0
Porcentaje de vacios de aire [%]		10.3	11.1	10.7


TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS				
RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL (I.N.V. E-748/07), GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECIMENES SSS (I.N.V. E-733 / 07) MÉTODO A numeral 8,2), ANALISIS VOLUMETRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EN CALIENTE (I.N.V. E-799/07)				
MEZCLA	MBRF+CH_33	Componentes	3% Agua	0% Cemento
GMM	2.178	MSH33-0_1	MSH33-0_2	Promedio
Peso del espécimen seco en el aire [g]		862.0	1053.4	958
Peso al aire del espécimen SSS [g]		864.4	1056.4	960
Peso del especimen en agua [g]		420.8	511.9	466
Gravedad específica bulk a 25 °C		1.943	1.935	1.939
Densidad a 25 ° C [Kg/m³]		1937	1929	1933
Absorción [%]		0.541	0.551	0.546
Espesor Briqueta [mm]		55.4	68.5	62.0
Estabilidad medida [Kg]		1062	1526	1294
Flujo [mm]		3.8	4.3	4.1
Porcentaje de vacios de aire [%]		10.8	11.2	11.0


TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS				
RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL (I.N.V. E-748/07), GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECIMENES SSS (I.N.V. E-733 / 07) MÉTODO A numeral 8,2), ANALISIS VOLUMETRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EN CALIENTE (I.N.V. E-799/07)				
MEZCLA	MBRF+CH_33	Componentes	3% Agua	1% Cemento
GMM	2.178	MSH33-1_1	MSH33-1_2	Promedio
Peso del espécimen seco en el aire [g]		1048.3	1062.8	1056
Peso al aire del espécimen SSS [g]		1050.9	1065.6	1058
Peso del especimen en agua [g]		513.7	520.2	517
Gravedad específica bulk a 25 °C		1.951	1.949	1.950
Densidad a 25 ° C [Kg/m³]		1946	1943	1944
Absorción [%]		0.484	0.513	0.499
Espesor Briqueta [mm]		67.0	67.9	67.5
Estabilidad medida [Kg]		2248	2505	2377
Flujo [mm]		4.8	4.6	4.7
Porcentaje de vacios de aire [%]		10.4	10.5	10.5


TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS				
RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL (I.N.V. E-748/07), GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECIMENES SSS (I.N.V. E-733 / 07) MÉTODO A numeral 8,2), ANALISIS VOLUMETRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EN CALIENTE (I.N.V. E-799/07)				
MEZCLA	MBRF+CH_33	Componentes	3% Agua	2% Cemento
GMM	2.178	MSH33-2_1	MSH33-2_2	Promedio
Peso del espécimen seco en el aire [g]		1059.3	1046.2	1053
Peso al aire del espécimen SSS [g]		1062.1	1048.2	1055
Peso del especimen en agua [g]		517.0	511.4	514
Gravedad específica bulk a 25 °C		1.943	1.949	1.946
Densidad a 25 ° C [Kg/m³]		1937	1943	1940
Absorción [%]		0.514	0.373	0.443
Espesor Briqueta [mm]		68.2	67.5	67.9
Estabilidad medida [Kg]		2773	2605	2689
Flujo [mm]		4.3	4.6	4.4
Porcentaje de vacios de aire [%]		10.8	10.5	10.6


TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS				
RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL (I.N.V. E-748/07), GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECIMENES SSS (I.N.V. E-733 / 07) MÉTODO A numeral 8,2), ANALISIS VOLUMETRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EN CALIENTE (I.N.V. E-799/07)				
MEZCLA	MBRF+CH_33	Componentes	3% Agua	3% Cemento
GMM	2.178	MSH33-3_1	MSH33-3_2	Promedio
Peso del espécimen seco en el aire [g]		1057.5	1059.1	1058
Peso al aire del espécimen SSS [g]		1059.3	1060.5	1060
Peso del especimen en agua [g]		517.2	517.6	517
Gravedad específica bulk a 25 °C		1.951	1.951	1.951
Densidad a 25 ° C [Kg/m³]		1945	1945	1945
Absorción [%]		0.332	0.258	0.295
Espesor Briqueta [mm]		67.9	68.0	68.0
Estabilidad medida [Kg]		2805	2923	2864
Flujo [mm]		4.3	4.1	4.2
Porcentaje de vacios de aire [%]		10.4	10.4	10.4


TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS				
RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL (I.N.V. E-748/07), GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECIMENES SSS (I.N.V. E-733 / 07) MÉTODO A numeral 8,2), ANALISIS VOLUMETRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EN CALIENTE (I.N.V. E-799/07)				
MEZCLA	MBRF+CH_33	Componentes	3% Agua	4% Cemento
GMM	2.178	MSH33-4_1	MSH33-4_2	Promedio
Peso del espécimen seco en el aire [g]		1062.8	1059.6	1061
Peso al aire del espécimen SSS [g]		1064.2	1061.3	1063
Peso del especimen en agua [g]		521.1	526.0	524
Gravedad específica bulk a 25 °C		1.957	1.979	1.968
Densidad a 25 ° C [Kg/m³]		1951	1974	1962
Absorción [%]		0.258	0.318	0.288
Espesor Briqueta [mm]		67.8	67.3	67.6
Estabilidad medida [Kg]		3452	3240	3346
Flujo [mm]		4.8	4.8	4.8
Porcentaje de vacios de aire [%]		10.2	9.1	9.6


TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA						UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS						
EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA (I.N.V. E-725/07)						
MEZCLA	MBRF+CH_23	Componentes		2% Agua	0% Cemento	
GMM	2.178	TI23-0_1	SM-TI23-0_2	SM-TI23-0_3	TI23-0_4	
Diametro [mm]		101.6	101.6	101.6	101.6	
Altura [mm]		69.7	69.8	69.6	68.4	
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1061.2	1047.7	1045.6	1056.6	
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1063	1049.7	1047.2	1058.5	
Peso del especimen en agua [g]		530.2	520.3	522.6	527.8	
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		532.8	529.4	524.6	530.7	
Gravedad específica bulk a 25 °C		1.992	1.979	1.993	1.991	
Vacíos de aire en la briqueta [%]		8.6	9.1	8.5	8.6	
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		45.6	48.4	44.5	45.6	
SATURACION PARCIAL (55-80%)						
Briqueta		SM-TI23-0_2		SM-TI23-0_3		
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1047.7		1045.6		
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1083.9		1075.6		
Peso del especimen en agua [g]		543.6		539.6		
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		540.3		536		
Volumen absorbido de agua [cm³]		36.2		30.0		
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		48.4		44.5		
Grado de saturación [%]		74.9		67.4		
Hinchamiento [%]		2.1		2.2		
CLASIFICACIÓN DE BRIQUETAS POR SUBGRUPOS						
DESCRIPCIÓN		BRIQUETAS		CONTENIDO PROMEDIO DE VACIOS CON AIRE [%]		
SUBGRUPO 1 grupo seco		TI23-0_1	TI23-0_4	8.6		
SUBGRUPO 2 grupo húmedo		SM-TI23-0_2	SM-TI23-0_3	8.8		
ACONDICIONAMIENTO DE HUMEDAD EN AGUA A 60 °C DURANTE 24h (GRADO DE SATURACION >80%)						
Briqueta		SM-TI23-0_2		SM-TI23-0_3		
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1047.7		1045.6		
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1096		1088.6		
Peso del especimen en agua [g]		549.6		550.0		
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		546.4		538.6		
Volumen absorbido de agua [cm³]		48.3		43.0		
Grado de saturación [%]		99.9		96.6		
Hinchamiento [%]		3.2		2.7		
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN						
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]	
SUBGRUPO 1 grupo seco	TI23-0_1	69.7	101.6	498	4.57	
	TI23-0_4	68.4	101.6	459	4.29	
PROMEDIO					4.43	
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]	
SUBGRUPO 2 grupo húmedo	SM-TI23-0_2	69.8	101.6	130	1.19	
	SM-TI23-0_3	69.7	101.6	154	1.41	
PROMEDIO					1.30	
RESISTENCIA CONSERVADA PROMEDIO [%]			29			


TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA					 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS					
EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA (I.N.V. E-725/07)					
MEZCLA	MBRF+CH_23	Componentes		2% Agua	1% Cemento
GMM	2.178	TI23-1_1	TI23-1_2	SM-TI23-1_3	SM-TI23-1_4
Diámetro [mm]		101.6	101.6	101.6	101.6
Altura [mm]		70	70.9	70.4	69.3
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1069.9	1053.9	1066.6	1048.7
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1072.1	1056.3	1068.7	1050.9
Peso del especimen en agua [g]		532.2	527.5	533.5	520.2
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		539.9	528.8	535.2	530.7
Gravedad específica bulk a 25 °C		1.982	1.993	1.993	1.976
Vacíos de aire en la briqueta [%]		9.0	8.5	8.5	9.3
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		48.7	44.9	45.5	49.2
SATURACION PARCIAL (55-80%)					
Briqueta		SM-TI23-1_3		SM-TI23-1_4	
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1066.6		1048.7	
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1102		1084.2	
Peso del especimen en agua [g]		556.2		540.9	
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		545.8		543.3	
Volumen absorbido de agua [cm³]		35.4		35.5	
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		45.5		49.2	
Grado de saturación [%]		77.8		72.1	
Hinchamiento [%]		2.0		2.4	
CLASIFICACIÓN DE BRIQUETAS POR SUBGRUPOS					
DESCRIPCIÓN		BRIQUETAS		CONTENIDO PROMEDIO DE VACIOS CON AIRE [%]	
SUBGRUPO 1 grupo seco		TI23-1_1	TI23-1_2	8.8	
SUBGRUPO 2 grupo húmedo		SM-TI23-1_3	SM-TI23-1_4	8.9	
ACONDICIONAMIENTO DE HUMEDAD EN AGUA A 60 °C DURANTE 24h (GRADO DE SATURACION >80%)					
Briqueta		SM-TI23-1_3		SM-TI23-1_4	
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1066.6		1048.7	
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1109		1098.5	
Peso del especimen en agua [g]		560.3		550.2	
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		548.7		548.3	
Volumen absorbido de agua [cm³]		42.4		49.8	
Grado de saturación [%]		93.2		101.2	
Hinchamiento [%]		2.5		3.3	
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN					
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]
SUBGRUPO 1 grupo seco	TI23-1_1	70	101.6	467	4.26
	TI23-1_2	70.9	101.6	428	3.86
PROMEDIO					4.06
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]
SUBGRUPO 2 grupo húmedo	SM-TI23-1_3	70.5	101.6	187	1.70
	SM-TI23-1_4	69.3	101.6	237	2.19
PROMEDIO					1.94
RESISTENCIA CONSERVADA PROMEDIO [%]			48		


TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA					 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS					
EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA (I.N.V. E-725/07)					
MEZCLA	MBRF+CH_23	Componentes		2% Agua	2% Cemento
GMM	2.178	SM-TI23-2_1	SM-TI23-2_2	TI23-2_3	TI23-2_4
Diametro [mm]		101.6	101.6	101.6	101.6
Altura [mm]		69.2	69.4	68.5	67.9
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1063.1	1065.6	1066.2	1058.6
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1064.3	1067.2	1068.5	1061.2
Peso del especimen en agua [g]		536.4	533.6	536.9	533.2
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		527.9	533.6	531.6	528.0
Gravedad específica bulk a 25 °C		2.014	1.997	2.006	2.005
Vacíos de aire en la briqueta [%]		7.5	8.3	7.9	7.9
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		39.8	44.3	42.1	42.0
SATURACION PARCIAL (55-80%)					
Briqueta		SM-TI23-2_1		SM-TI23-2_2	
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1063.1		1065.6	
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1088.6		1099	
Peso del especimen en agua [g]		554.2		560.3	
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		534.4		538.7	
Volumen absorbido de agua [cm³]		25.5		33.4	
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		39.8		44.3	
Grado de saturación [%]		64.1		75.3	
Hinchamiento [%]		1.2		1.0	
CLASIFICACIÓN DE BRIQUETAS POR SUBGRUPOS					
DESCRIPCIÓN		BRIQUETAS		CONTENIDO PROMEDIO DE VACIOS CON AIRE [%]	
SUBGRUPO 1 grupo seco		TI23-2_3	TI23-2_4	7.9	
SUBGRUPO 2 grupo húmedo		SM-TI23-2_1	SM-TI23-2_2	7.9	
ACONDICIONAMIENTO DE HUMEDAD EN AGUA A 60 °C DURANTE 24h (GRADO DE SATURACION >80%)					
Briqueta		SM-TI23-2_1		SM-TI23-2_2	
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1063.1		1065.6	
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1102.3		1108.6	
Peso del especimen en agua [g]		554.2		560.3	
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		548.1		548.3	
Volumen absorbido de agua [cm³]		39.2		43.0	
Grado de saturación [%]		98.5		97.0	
Hinchamiento [%]		3.8		2.8	
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN					
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]
SUBGRUPO 1 grupo seco	TI23-2_3	68.5	101.6	439	4.10
	TI23-2_4	67.9	101.6	429	4.04
PROMEDIO					4.07
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]
SUBGRUPO 2 grupo húmedo	SM-TI23-2_1	69.2	101.6	315	2.91
	SM-TI23-2_2	69.4	101.6	299	2.75
PROMEDIO					2.83
RESISTENCIA CONSERVADA PROMEDIO [%]			70		


TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA						UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS						
EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA (I.N.V. E-725/07)						
MEZCLA	MBRF+CH_23	Componentes		2% Agua	3% Cemento	
GMM	2.178	SM-TI23-3_1	TI23-3_2	SM-TI23-3_3	TI23-3_4	
Diametro [mm]		101.6	101.6	101.6	101.6	
Altura [mm]		68.5	68	67.4	68.9	
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1040	1059.3	1052	1063.5	
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1041.2	1060.9	1053.9	1064.9	
Peso del especimen en agua [g]		525.1	533.4	526.9	535.6	
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		516.1	527.5	527.0	529.3	
Gravedad específica bulk a 25 °C		2.015	2.008	1.996	2.009	
Vacíos de aire en la briqueta [%]		7.5	7.8	8.3	7.7	
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		38.6	41.1	44.0	41.0	
SATURACION PARCIAL (55-80%)						
Briqueta		SM-TI23-3_1		SM-TI23-3_3		
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1040		1052		
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1066.3		1085.6		
Peso del especimen en agua [g]		540.6		546.3		
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		525.7		539.3		
Volumen absorbido de agua [cm³]		26.3		33.6		
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		38.6		44.0		
Grado de saturación [%]		68.1		76.4		
Hinchamiento [%]		1.9		2.3		
CLASIFICACIÓN DE BRIQUETAS POR SUBGRUPOS						
DESCRIPCIÓN		BRIQUETAS		CONTENIDO PROMEDIO DE VACIOS CON AIRE [%]		
SUBGRUPO 1 grupo seco		TI23-3_2	TI23-3_4	7.8		
SUBGRUPO 2 grupo húmedo		SM-TI23-3_1	SM-TI23-3_3	7.9		
ACONDICIONAMIENTO DE HUMEDAD EN AGUA A 60 °C DURANTE 24h (GRADO DE SATURACION >80%)						
Briqueta		SM-TI23-3_1		SM-TI23-3_3		
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1040		1052		
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1075.2		1095		
Peso del especimen en agua [g]		546.3		553.2		
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		528.9		541.8		
Volumen absorbido de agua [cm³]		35.2		43.0		
Grado de saturación [%]		91.2		97.8		
Hinchamiento [%]		2.5		2.8		
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN						
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]	
SUBGRUPO 1 grupo seco	TI23-3_2	68	101.6	413	3.88	
	TI23-3_4	68.9	101.6	397	3.68	
PROMEDIO					3.78	
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]	
SUBGRUPO 2 grupo húmedo	SM-TI23-3_1	68.5	101.6	344	3.21	
	SM-TI23-3_3	67.5	101.6	321	3.04	
PROMEDIO					3.12	
RESISTENCIA CONSERVADA PROMEDIO [%]			83			


TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA						UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS						
EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA (I.N.V. E-725/07)						
MEZCLA	MBRF+CH_23	Componentes		2% Agua	4% Cemento	
GMM	2.178	TI23-4_1	SM-TI23-4_2	SM-TI23-4_3	TI23-4_4	
Diametro [mm]		101.6	101.6	101.6	101.6	
Altura [mm]		69.9	70.3	70.7	70.3	
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1043.1	1068.2	1070.1	1057.6	
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1045.5	1070.7	1072.7	1058.7	
Peso del especimen en agua [g]		532.1	539.8	542.6	533.2	
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		513.4	530.9	530.1	525.5	
Gravedad específica bulk a 25 °C		2.032	2.012	2.019	2.013	
Vacíos de aire en la briqueta [%]		6.7	7.6	7.3	7.6	
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		34.5	40.5	38.8	39.9	
SATURACION PARCIAL (55-80%)						
Briqueta		SM-TI23-4_2		SM-TI23-4_3		
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1068.2		1070.1		
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1096.2		1099		
Peso del especimen en agua [g]		560.8		559.2		
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		535.4		539.8		
Volumen absorbido de agua [cm³]		28.0		28.9		
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		40.5		38.8		
Grado de saturación [%]		69.2		74.5		
Hinchamiento [%]		0.8		1.8		
CLASIFICACIÓN DE BRIQUETAS POR SUBGRUPOS						
DESCRIPCIÓN		BRIQUETAS		CONTENIDO PROMEDIO DE VACIOS CON AIRE [%]		
SUBGRUPO 1 grupo seco		TI23-4_1	TI23-4_4	7.2		
SUBGRUPO 2 grupo húmedo		SM-TI23-4_2	SM-TI23-4_3	7.5		
ACONDICIONAMIENTO DE HUMEDAD EN AGUA A 60 °C DURANTE 24h (GRADO DE SATURACION >80%)						
Briqueta		SM-TI23-4_2		SM-TI23-4_3		
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1068.2		1070.1		
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1106.6		1105.2		
Peso del especimen en agua [g]		560.8		559.2		
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		545.8		546		
Volumen absorbido de agua [cm³]		38.4		35.1		
Grado de saturación [%]		94.9		90.5		
Hinchamiento [%]		2.8		3.0		
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN						
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]	
SUBGRUPO 1 grupo seco	TI23-4_1	69.9	101.6	533	4.87	
	TI23-4_4	70.3	101.6	421	3.83	
PROMEDIO					4.35	
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]	
SUBGRUPO 2 grupo húmedo	SM-TI23-4_2	70.3	101.6	398	3.62	
	SM-TI23-4_3	70.8	101.6	462	4.17	
PROMEDIO					3.89	
RESISTENCIA CONSERVADA PROMEDIO [%]			90			

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA						UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS						
EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA (I.N.V. E-725/07)						
MEZCLA	MBRF+CH_33	Componentes		3% Agua	0% Cemento	
GMM	2.178	TI33-0_1	SM-TI33-0_2	TI33-0_3	SM-TI33-0_4	
Diametro [mm]		101.6	101.6	101.6	101.6	
Altura [mm]		69.2	68.6	68.5	69.6	
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1042.5	1036	1033	1043.9	
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1044.2	1038	1035	1045.9	
Peso del especimen en agua [g]		519.5	520.3	519.9	520.7	
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		524.7	517.7	515.1	525.2	
Gravedad específica bulk a 25 °C		1.987	2.001	2.005	1.988	
Vacíos de aire en la briqueta [%]		8.8	8.1	7.9	8.7	
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		46.0	42.0	40.8	45.9	
SATURACION PARCIAL (55-80%)						
Briqueta		SM-TI33-0_2		SM-TI33-0_4		
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1036		1043.9		
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1066.9		1079.6		
Peso del especimen en agua [g]		545.3		548.1		
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		521.6		531.5		
Volumen absorbido de agua [cm³]		30.9		35.7		
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		42.0		45.9		
Grado de saturación [%]		73.5		77.8		
Hinchamiento [%]		0.8		1.2		
CLASIFICACIÓN DE BRIQUETAS POR SUBGRUPOS						
DESCRIPCIÓN		BRIQUETAS		CONTENIDO PROMEDIO DE VACIOS CON AIRE [%]		
SUBGRUPO 1 grupo seco		TI33-0_1	TI33-0_3	8.3		
SUBGRUPO 2 grupo húmedo		SM-TI33-0_2	SM-TI33-0_4	8.4		
ACONDICIONAMIENTO DE HUMEDAD EN AGUA A 60 °C DURANTE 24h (GRADO DE SATURACION >80%)						
Briqueta		SM-TI33-0_2		SM-TI33-0_4		
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1036		1043.9		
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1077.5		1089.2		
Peso del especimen en agua [g]		545.3		548.1		
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		532.2		541.1		
Volumen absorbido de agua [cm³]		41.5		45.3		
Grado de saturación [%]		98.7		98.7		
Hinchamiento [%]		2.8		3.0		
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN						
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]	
SUBGRUPO 1 grupo seco	TI33-0_1	69.2	101.6	411	3.80	
	TI33-0_3	68.5	101.6	405	3.78	
PROMEDIO					3.79	
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]	
SUBGRUPO 2 grupo húmedo	SM-TI33-0_2	68.6	101.6	123	1.15	
	SM-TI33-0_4	69.6	101.6	102	0.94	
PROMEDIO					1.04	
RESISTENCIA CONSERVADA PROMEDIO [%]			27			

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA						UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS						
EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA (I.N.V. E-725/07)						
MEZCLA	MBRF+CH_33	Componentes		3% Agua	1% Cemento	
GMM	2.178	SM-TI33-1_1	TI33-1_2	TI33-1_3	SM-TI33-1_4	
Diametro [mm]		101.6	101.6	101.6	101.6	
Altura [mm]		69	69.3	68.5	69.2	
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1047.6	1044.4	1036.2	1054.3	
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1049.8	1047.1	1039.8	1057.4	
Peso del especimen en agua [g]		522.1	528.2	524.0	534.2	
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		527.7	518.9	515.8	523.2	
Gravedad específica bulk a 25 °C		1.985	2.013	2.009	2.015	
Vacíos de aire en la briqueta [%]		8.9	7.6	7.8	7.5	
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		46.7	39.4	40.0	39.1	
SATURACION PARCIAL (55-80%)						
Briqueta		SM-TI33-1_1		SM-TI33-1_4		
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1047.6		1054.3		
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1081.2		1085		
Peso del especimen en agua [g]		548.2		556.3		
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		533		528.7		
Volumen absorbido de agua [cm³]		33.6		30.7		
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		46.7		39.1		
Grado de saturación [%]		71.9		78.5		
Hinchamiento [%]		1.0		1.1		
CLASIFICACIÓN DE BRIQUETAS POR SUBGRUPOS						
DESCRIPCIÓN		BRIQUETAS		CONTENIDO PROMEDIO DE VACIOS CON AIRE [%]		
SUBGRUPO 1 grupo seco		TI33-1_2	TI33-1_3	7.7		
SUBGRUPO 2 grupo húmedo		SM-TI33-1_1	SM-TI33-1_4	8.2		
ACONDICIONAMIENTO DE HUMEDAD EN AGUA A 60 °C DURANTE 24h (GRADO DE SATURACION >80%)						
Briqueta		SM-TI33-1_1		SM-TI33-1_4		
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1047.6		1054.3		
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1093.3		1093.9		
Peso del especimen en agua [g]		554.6		556.3		
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		538.7		535.6		
Volumen absorbido de agua [cm³]		45.7		39.6		
Grado de saturación [%]		97.8		101.2		
Hinchamiento [%]		2.1		2.4		
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN						
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]	
SUBGRUPO 1 grupo seco	TI33-1_2	69.3	101.6	405	3.74	
	TI33-1_3	68.5	101.6	423	3.95	
PROMEDIO					3.84	
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]	
SUBGRUPO 2 grupo húmedo	SM-TI33-1_1	69.0	101.6	253	2.34	
	SM-TI33-1_4	69.3	101.6	236	2.18	
PROMEDIO					2.26	
RESISTENCIA CONSERVADA PROMEDIO [%]			59			

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA						UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS						
EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA (I.N.V. E-725/07)						
MEZCLA	MBRF+CH_33	Componentes		3% Agua	2% Cemento	
GMM	2.178	SM-TI33-2_1	SM-TI33-2_2	TI33-2_3	TI33-2_4	
Diametro [mm]		101.6	101.6	101.6	101.6	
Altura [mm]		68.2	68.5	67.5	68.6	
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1046	1065.8	1056.3	1036.6	
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1048.9	1068.1	1058.8	1040	
Peso del especimen en agua [g]		528.4	536.6	531.2	526.2	
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		520.5	531.5	527.6	513.8	
Gravedad específica bulk a 25 °C		2.010	2.005	2.002	2.018	
Vacíos de aire en la briqueta [%]		7.7	7.9	8.1	7.4	
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		40.2	42.2	42.6	37.9	
SATURACION PARCIAL (55-80%)						
Briqueta		SM-TI33-2_1		SM-TI33-2_2		
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1046		1065.8		
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1077.8		1099		
Peso del especimen en agua [g]		551.2		563.9		
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		526.6		535.1		
Volumen absorbido de agua [cm³]		31.8		33.2		
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		40.2		42.2		
Grado de saturación [%]		79.0		78.8		
Hinchamiento [%]		1.2		0.7		
CLASIFICACIÓN DE BRIQUETAS POR SUBGRUPOS						
DESCRIPCIÓN		BRIQUETAS		CONTENIDO PROMEDIO DE VACIOS CON AIRE [%]		
SUBGRUPO 1 grupo seco		TI33-2_3	TI33-2_4	7.7		
SUBGRUPO 2 grupo húmedo		SM-TI33-2_1	SM-TI33-2_2	7.8		
ACONDICIONAMIENTO DE HUMEDAD EN AGUA A 60 °C DURANTE 24h (GRADO DE SATURACION >80%)						
Briqueta		SM-TI33-2_1		SM-TI33-2_2		
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1046		1065.8		
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1085.3		1106		
Peso del especimen en agua [g]		554.3		568.0		
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		531		538		
Volumen absorbido de agua [cm³]		39.3		40.2		
Grado de saturación [%]		97.7		95.4		
Hinchamiento [%]		2.0		1.2		
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN						
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]	
SUBGRUPO 1 grupo seco	TI33-2_3	67.5	101.6	477	4.52	
	TI33-2_4	68.6	101.6	452	4.21	
PROMEDIO					4.36	
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]	
SUBGRUPO 2 grupo húmedo	SM-TI33-2_1	68.3	101.6	306	2.86	
	SM-TI33-2_2	68.6	101.6	324	3.02	
PROMEDIO					2.94	
RESISTENCIA CONSERVADA PROMEDIO [%]			67			

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA						UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS						
EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA (I.N.V. E-725/07)						
MEZCLA	MBRF+CH_33	Componentes		3% Agua	3% Cemento	
GMM	2.178	SM-TI33-3_1	SM-TI33-3_2	TI33-3_3	TI33-3_4	
Diametro [mm]		101.6	101.6	101.6	101.6	
Altura [mm]		68.2	68.5	67.5	68.6	
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1052.8	1046.5	1049.9	1056.1	
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1053.2	1049.6	1053.4	1059.2	
Peso del especimen en agua [g]		528.2	528.6	529.0	535.2	
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		525.0	521.0	524.4	524.0	
Gravedad específica bulk a 25 °C		2.005	2.009	2.002	2.015	
Vacíos de aire en la briqueta [%]		7.9	7.8	8.1	7.5	
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		41.6	40.5	42.4	39.1	
SATURACION PARCIAL (55-80%)						
Briqueta		SM-TI33-3_1		SM-TI33-3_2		
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1052.8		1046.5		
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1083.2		1078		
Peso del especimen en agua [g]		554.0		552.4		
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		529.2		525.6		
Volumen absorbido de agua [cm³]		30.4		31.5		
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		41.6		40.5		
Grado de saturación [%]		73.0		77.8		
Hinchamiento [%]		0.8		0.9		
CLASIFICACIÓN DE BRIQUETAS POR SUBGRUPOS						
DESCRIPCIÓN		BRIQUETAS		CONTENIDO PROMEDIO DE VACIOS CON AIRE [%]		
SUBGRUPO 1 grupo seco		TI33-3_3	TI33-3_4	7.8		
SUBGRUPO 2 grupo húmedo		SM-TI33-3_1	SM-TI33-3_2	7.9		
ACONDICIONAMIENTO DE HUMEDAD EN AGUA A 60 °C DURANTE 24h (GRADO DE SATURACION >80%)						
Briqueta		SM-TI33-3_1		SM-TI33-3_2		
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1052.8		1046.5		
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1092.3		1083		
Peso del especimen en agua [g]		557.2		553.9		
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		535.1		529.1		
Volumen absorbido de agua [cm³]		39.5		36.5		
Grado de saturación [%]		94.9		90.1		
Hinchamiento [%]		1.9		1.6		
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN						
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]	
SUBGRUPO 1 grupo seco	TI33-3_3	67.5	101.6	539	5.10	
	TI33-3_4	68.6	101.6	550	5.12	
PROMEDIO					5.11	
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]	
SUBGRUPO 2 grupo húmedo	SM-TI33-3_1	68.2	101.6	344	3.22	
	SM-TI33-3_2	68.6	101.6	354	3.30	
PROMEDIO					3.26	
RESISTENCIA CONSERVADA PROMEDIO [%]			64			

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA						UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS						
EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA (I.N.V. E-725/07)						
MEZCLA	MBRF+CH_33	Componentes		3% Agua	4% Cemento	
GMM	2.178	SM-TI33-4_1	TI33-4_2	SM-TI33-4_3	TI33-4_4	
Diametro [mm]		101.6	101.6	101.6	101.6	
Altura [mm]		68.4	69.6	68.9	67.9	
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1049.8	1048.2	1046.6	1045.2	
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1051.3	1050.1	1048.6	1047.2	
Peso del especimen en agua [g]		529.5	528.6	528.5	529.2	
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		521.8	521.5	520.1	518.0	
Gravedad específica bulk a 25 °C		2.012	2.010	2.012	2.018	
Vacíos de aire en la briqueta [%]		7.6	7.7	7.6	7.4	
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		39.8	40.2	39.6	38.1	
SATURACION PARCIAL (55-80%)						
Briqueta		SM-TI33-4_1		SM-TI33-4_3		
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1049.8		1046.6		
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1080.1		1075		
Peso del especimen en agua [g]		553.2		546.9		
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		526.9		528.1		
Volumen absorbido de agua [cm³]		30.3		28.4		
Volumen de vacíos en la briqueta [cm³]		39.8		39.6		
Grado de saturación [%]		76.1		71.8		
Hinchamiento [%]		1.0		1.5		
CLASIFICACIÓN DE BRIQUETAS POR SUBGRUPOS						
DESCRIPCIÓN		BRIQUETAS		CONTENIDO PROMEDIO DE VACIOS CON AIRE [%]		
SUBGRUPO 1 grupo seco		TI33-4_2	TI33-4_4	7.5		
SUBGRUPO 2 grupo húmedo		SM-TI33-4_1	SM-TI33-4_3	7.6		
ACONDICIONAMIENTO DE HUMEDAD EN AGUA A 60 °C DURANTE 24h (GRADO DE SATURACION >80%)						
Briqueta		SM-TI33-4_1		SM-TI33-4_3		
Peso seca del espécimen en el aire [g]		1049.8		1046.6		
Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]		1088.6		1083.2		
Peso del especimen en agua [g]		556.0		550.2		
Peso del volumen de agua a 25 °C [g]		532.6		533		
Volumen absorbido de agua [cm³]		38.8		36.6		
Grado de saturación [%]		97.5		92.5		
Hinchamiento [%]		2.1		2.5		
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN						
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]	
SUBGRUPO 1 grupo seco	TI33-4_2	69.6	101.6	436	4.00	
	TI33-4_4	67.9	101.6	469	4.41	
PROMEDIO					4.21	
Grupo	Briqueta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Fuerza [Kg]	Resistencia a la tracción [Kg/cm²]	
SUBGRUPO 2 grupo húmedo	SM-TI33-4_1	68.4	101.6	403	3.77	
	SM-TI33-4_3	68.9	101.6	388	3.60	
PROMEDIO					3.68	
RESISTENCIA CONSERVADA PROMEDIO [%]			87			

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS



EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA (I.N.V. E-725/07)

MEZCLA	MBRF+CH_23	Componentes		2% Agua	0% - 4% Cemento	
GMM	2.178	TI23-0_5	TI23-1_5	TI23-2_5	TI23-3_5	TI23-4_5
Peso del espécimen seco en el aire [g]		1034.8	1039.8	1056.4	1042.1	1038.0
Peso al aire del espécimen SSS [g]		1037.9	1042.9	1059.4	1044.8	1039.8
Peso del espécimen en agua [g]		502.1	505.2	516.1	509.4	507.1
Gravedad específica bulk a 25 °C		1.931	1.934	1.944	1.946	1.949
Densidad a 25 ° C [Kg/m³]		1926	1928	1939	1941	1943
Absorción [%]		0.579	0.577	0.552	0.504	0.338
Espesor Briqueta [mm]		65.3	64.8	66.0	65.2	65.8
Fuerza medida [Kg]		0	649	621	671	751
Diametro Briqueta [mm]		101.6	101.6	101.6	101.6	101.6
Resistencia a la tracción [Kg/cm²]		0.00	6.40	6.01	6.58	7.29
Porcentaje de vacios de aire [%]		11.3	11.2	10.7	10.6	10.5


TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS



EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA (I.N.V. E-725/07)

MEZCLA	MBRF+CH_33	Componentes		3% Agua	0% - 4% Cemento	
GMM	2.178	TI33-0_5	TI33-1_5	TI33-2_5	TI33-3_5	TI33-4_5
Peso del espécimen seco en el aire [g]		1039.5	1042.5	1036.5	1029.8	1032.5
Peso al aire del espécimen SSS [g]		1043.2	1045.9	1038.6	1030.9	1033.7
Peso del espécimen en agua [g]		506.1	508.9	505.7	502.4	508.3
Gravedad específica bulk a 25 °C		1.935	1.941	1.945	1.949	1.965
Densidad a 25 ° C [Kg/m³]		1930	1936	1939	1943	1959
Absorción [%]		0.689	0.633	0.394	0.208	0.228
Espesor Briqueta [mm]		67.1	66.9	65.8	66.4	65.4
Fuerza medida [Kg]		678	0	757	670	842
Diametro Briqueta [mm]		101.6	101.6	101.6	101.6	101.6
Resistencia a la tracción [Kg/cm²]		6.46	0.00	7.35	6.45	8.23
Porcentaje de vacios de aire [%]		11.1	10.9	10.7	10.5	9.8

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA								 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS									
ENSAYO DE INMERSIÓN - COMPRESIÓN (INV E-738) ANEXO A -EFECTO DEL AGUA SOBRE LA COHESIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS ELABORADAS EN FRÍO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA									
MEZCLA			MBRF+CH_23	Componentes		2% Agua		0% Cemento	
GMM		2.178	Peso seca del espécimen en el aire [g]	Peso del especimen en agua [g]	Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]	Gravedad específica bulk a 25 °C	Carga máxima [kN]	Resistencia a la compresión [Kg/cm ²]	Vacíos de aire en la briqueta [%]
Briqueta	Diametro [mm]	Altura [mm]							
IC23-0_3	101.2	101.6	1689.6	871.5	1693.5	2.055	31.68	39.08	5.6
IC23-0_4	100.8	101.6	1700.6	877.9	1703.6	2.060	29.50	36.39	5.4
PROMEDIO SUBGRUPO 1 grupo seco						2.058	30.59	37.73	5.53
PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA									
SM-IC23-0_1	101.8	101.6	1682.5	873.5	1685.7	2.072	16.24	20.03	4.9
SM-IC23-0_2	102.0	101.5	1702.2	875.6	1705.2	2.052	15.66	19.35	5.8
PROMEDIO SUBGRUPO 2 grupo húmedo						2.062	15.95	19.69	5.34
Indice de Resistencia Conservada Promedio [%]							52		

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS



**ENSAYO DE INMERSIÓN - COMPRESIÓN (INV E-738)
ANEXO A -EFECTO DEL AGUA SOBRE LA COHESIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
ELABORADAS EN FRIÓ CON EMULSIÓN ASFÁLTICA**

MEZCLA			MBRF+CH_23		Componentes		2% Agua	1% Cemento	
GMM		2.178	Peso seca del espécimen en el aire [g]	Peso del especimen en agua [g]	Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]	Gravedad específica bulk a 25°C	Carga máxima [kN]	Resistencia a la compresión [Kg/cm ²]	Vacios de aire en la briqueta [%]
Briqueta	Diametro [mm]	Altura [mm]							
IC23-1_1	102.4	101.6	1718.1	890.4	1721.2	2.068	29.52	36.41	5.1
IC23-1_4	101.3	101.6	1726.5	891.2	1729.8	2.059	31.24	38.53	5.5
PROMEDIO SUBGRUPO 1 grupo seco						2.063	30.38	37.47	5.26
PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA									
SM-IC23-1_2	101.8	101.6	1705.6	884.2	1708.6	2.069	19.44	23.98	5.0
SM-IC23-1_3	102.4	101.6	1706.9	880.9	1709.6	2.060	17.90	22.08	5.4
PROMEDIO SUBGRUPO 2 grupo húmedo						2.064	18.67	23.03	5.22
Indice de Resistencia Conservada Promedio [%]							61		

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS



**ENSAYO DE INMERSIÓN - COMPRESIÓN (INV E-738)
ANEXO A -EFECTO DEL AGUA SOBRE LA COHESIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
ELABORADAS EN FRIÓ CON EMULSIÓN ASFÁLTICA**

MEZCLA			MBRF+CH_23	Componentes		2% Agua		2% Cemento	
GMM		2.178	Peso seca del espécimen en el aire [g]	Peso del especimen en agua [g]	Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]	Gravedad específica bulk a 25°C	Carga máxima [kN]	Resistencia a la compresión [Kg/cm ²]	Vacios de aire en la briqueta [%]
Briqueta	Diametro [mm]	Altura [mm]							
IC23-2_1	101.2	101.6	1735.3	901.8	1739.4	2.072	31.30	38.61	4.9
IC23-2_4	102.3	101.6	1789.3	924.1	1794.3	2.056	30.72	37.89	5.6
PROMEDIO SUBGRUPO 1 grupo seco						2.064	31.01	38.25	5.24
PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA									
SM-IC23-2_2	107.5	101.6	1773.9	920.5	1778.3	2.068	24.12	29.75	5.1
SM-IC23-2_3	107.3	101.6	1786.2	927.9	1790.2	2.071	23.28	28.71	4.9
PROMEDIO SUBGRUPO 2 grupo húmedo						2.070	23.70	29.23	4.97
Indice de Resistencia Conservada Promedio [%]							76		

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS



**ENSAYO DE INMERSIÓN - COMPRESIÓN (INV E-738)
ANEXO A -EFECTO DEL AGUA SOBRE LA COHESIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
ELABORADAS EN FRIÓ CON EMULSIÓN ASFÁLTICA**

MEZCLA			MBRF+CH_23		Componentes		2% Agua	3% Cemento	
GMM		2.178	Peso seca del espécimen en el aire [g]	Peso del especimen en agua [g]	Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]	Gravedad específica bulk a 25°C	Carga máxima [kN]	Resistencia a la compresión [Kg/cm ²]	Vacíos de aire en la briqueta [%]
Briqueta	Diametro [mm]	Altura [mm]							
IC23-3_1	102.4	101.6	1723.6	895.6	1726.7	2.074	33.66	41.52	4.8
IC23-3_3	102.3	101.6	1700.5	886.5	1704.5	2.079	33.78	41.67	4.6
PROMEDIO SUBGRUPO 1 grupo seco						2.076	33.72	41.59	4.67
PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA									
SM-IC23-3_2	101.1	101.6	1705.6	886.4	1709.2	2.073	26.34	32.49	4.8
SM-IC23-3_4	103.2	101.6	1733.0	904.1	1737.4	2.080	28.20	34.78	4.5
PROMEDIO SUBGRUPO 2 grupo húmedo						2.076	27.27	33.64	4.67
Indice de Resistencia Conservada Promedio [%]							81		

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS



**ENSAYO DE INMERSIÓN - COMPRESIÓN (INV E-738)
ANEXO A -EFECTO DEL AGUA SOBRE LA COHESIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
ELABORADAS EN FRIÓ CON EMULSIÓN ASFÁLTICA**

MEZCLA			MBRF+CH_23		Componentes		2% Agua	4% Cemento	
GMM		2.178	Peso seca del espécimen en el aire [g]	Peso del especimen en agua [g]	Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]	Gravedad específica bulk a 25°C	Carga máxima [kN]	Resistencia a la compresión [Kg/cm ²]	Vacíos de aire en la briqueta [%]
Briqueta	Diametro [mm]	Altura [mm]							
IC23-4_1	102.5	101.6	1705.6	894.7	1708.2	2.097	35.26	43.49	3.7
IC23-4_2	101.2	101.6	1700.6	886.0	1703.6	2.080	36.24	44.70	4.5
PROMEDIO SUBGRUPO 1 grupo seco						2.088	35.75	44.10	4.12
PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA									
SM-IC23-4_3	101.2	101.6	1703.2	893.4	1707.1	2.093	28.98	35.75	3.9
SM-IC23-4_4	103.2	101.6	1725.4	901.0	1728.2	2.086	29.64	36.56	4.2
PROMEDIO SUBGRUPO 2 grupo húmedo						2.089	29.31	36.15	4.06
Indice de Resistencia Conservada Promedio [%]							82		

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS



**ENSAYO DE INMERSIÓN - COMPRESIÓN (INV E-738)
ANEXO A -EFECTO DEL AGUA SOBRE LA COHESIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
ELABORADAS EN FRIÓ CON EMULSIÓN ASFÁLTICA**

MEZCLA			MBRF+CH_33		Componentes		3% Agua	0% Cemento	
GMM		2.178	Peso seca del espécimen en el aire [g]	Peso del especimen en agua [g]	Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]	Gravedad específica bulk a 25°C	Carga máxima [kN]	Resistencia a la compresión [Kg/cm ²]	Vacios de aire en la briqueta [%]
Briqueta	Diametro [mm]	Altura [mm]							
IC33-0_2	102.1	101.6	1692.3	870.9	1695.5	2.052	29.72	36.66	5.8
IC33-0_3	101.9	101.6	1700.2	869.6	1704.1	2.037	30.26	37.32	6.5
PROMEDIO SUBGRUPO 1 grupo seco						2.045	29.99	36.99	6.11
PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA									
SM-IC33-0_1	107.8	101.6	1689.6	863.2	1692.3	2.038	16.40	20.23	6.4
SM-IC33-0_4	107.1	101.6	1694.5	873.5	1698.2	2.055	15.78	19.46	5.7
PROMEDIO SUBGRUPO 2 grupo húmedo						2.046	16.09	19.85	6.05
Indice de Resistencia Conservada Promedio [%]							54		

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS



**ENSAYO DE INMERSIÓN - COMPRESIÓN (INV E-738)
ANEXO A -EFECTO DEL AGUA SOBRE LA COHESIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
ELABORADAS EN FRIÓ CON EMULSIÓN ASFÁLTICA**

MEZCLA			MBRF+CH_33		Componentes		3% Agua	1% Cemento	
GMM		2.178	Peso seca del espécimen en el aire [g]	Peso del especimen en agua [g]	Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]	Gravedad específica bulk a 25°C	Carga máxima [kN]	Resistencia a la compresión [Kg/cm ²]	Vacios de aire en la briqueta [%]
Briqueta	Diametro [mm]	Altura [mm]							
IC33-1_1	102.6	101.6	1703.6	882.2	1706.0	2.068	35.74	44.08	5.1
IC33-1_3	100.9	101.6	1680.2	865.9	1684.2	2.053	36.88	45.49	5.7
PROMEDIO SUBGRUPO 1 grupo seco						2.061	36.31	44.79	5.39
PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA									
SM-IC33-1_2	101.9	101.6	1730.2	893.1	1733.2	2.060	25.46	31.40	5.4
SM-IC33-1_4	102.0	101.5	1699.8	881.2	1702.9	2.069	23.82	29.44	5.0
PROMEDIO SUBGRUPO 2 grupo húmedo						2.064	24.64	30.42	5.23
Indice de Resistencia Conservada Promedio [%]							68		

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS



**ENSAYO DE INMERSIÓN - COMPRESIÓN (INV E-738)
ANEXO A -EFECTO DEL AGUA SOBRE LA COHESIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
ELABORADAS EN FRIÓ CON EMULSIÓN ASFÁLTICA**

MEZCLA			MBRF+CH_33		Componentes		3% Agua	2% Cemento	
GMM		2.178	Peso seca del espécimen en el aire [g]	Peso del especimen en agua [g]	Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]	Gravedad específica bulk a 25°C	Carga máxima [kN]	Resistencia a la compresión [Kg/cm ²]	Vacíos de aire en la briqueta [%]
Briqueta	Diametro [mm]	Altura [mm]							
IC33-2_1	100.8	101.6	1692.5	877.0	1695.2	2.069	36.14	44.58	5.0
IC33-2_2	101.5	101.6	1693.2	873.2	1696.2	2.057	37.26	45.96	5.5
PROMEDIO SUBGRUPO 1 grupo seco						2.063	36.70	45.27	5.28
PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA									
SM-IC33-2_3	101.5	101.6	1706.2	882.8	1709.0	2.065	26.36	32.51	5.2
SM-IC33-2_4	103.0	101.6	1729.2	893.5	1732.3	2.062	26.12	32.22	5.3
PROMEDIO SUBGRUPO 2 grupo húmedo						2.063	26.24	32.37	5.27
Indice de Resistencia Conservada Promedio [%]							71		

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS



**ENSAYO DE INMERSIÓN - COMPRESIÓN (INV E-738)
ANEXO A -EFECTO DEL AGUA SOBRE LA COHESIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
ELABORADAS EN FRIÓ CON EMULSIÓN ASFÁLTICA**

MEZCLA			MBRF+CH_33		Componentes			3% Agua		3% Cemento	
GMM			2.178		Peso seca del espécimen en el aire [g]	Peso del especimen en agua [g]	Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]	Gravedad específica bulk a 25°C	Carga máxima [kN]	Resistencia a la compresión [Kg/cm ²]	Vacios de aire en la briqueta [%]
Briqueta	Diametro [mm]	Altura [mm]									
IC33-3_1	102.6	101.6	1723.6	896.2	1726.1	2.077	36.58	45.12	4.6		
IC33-3_3	102.6	101.6	1706.9	890.4	1709.8	2.083	37.00	45.64	4.4		
PROMEDIO SUBGRUPO 1 grupo seco							2.080	36.79	45.38	4.50	
PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA											
SM-IC33-3_2	102.1	101.6	1700.6	889.3	1703.5	2.089	26.84	33.11	4.1		
SM-IC33-3_4	101.7	101.5	1720.5	888.1	1722.8	2.061	26.20	32.38	5.4		
PROMEDIO SUBGRUPO 2 grupo húmedo							2.075	26.52	32.74	4.73	
Indice de Resistencia Conservada Promedio [%]								72			


TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

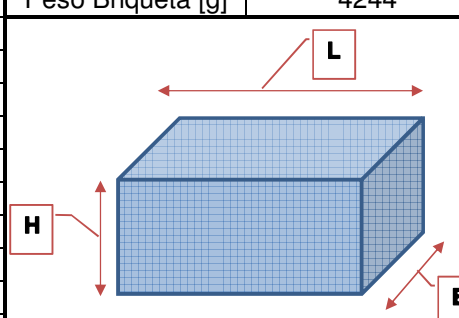
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS

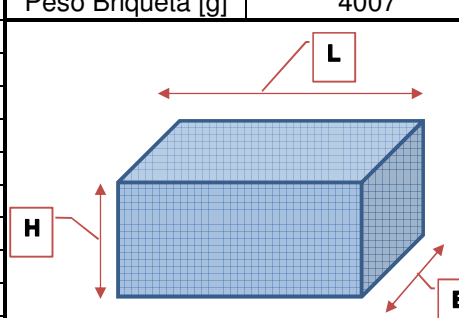


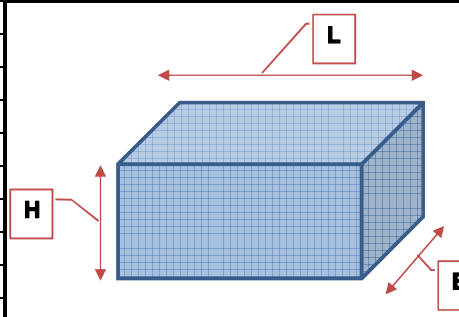
**ENSAYO DE INMERSIÓN - COMPRESIÓN (INV E-738)
ANEXO A -EFECTO DEL AGUA SOBRE LA COHESIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
ELABORADAS EN FRIÓ CON EMULSIÓN ASFÁLTICA**


MEZCLA			MBRF+CH_33		Componentes		3% Agua	4% Cemento	
GMM		2.178	Peso seca del espécimen en el aire [g]	Peso del especimen en agua [g]	Peso al aire del espécimen saturado y superficialmente seco [g]	Gravedad específica bulk a 25°C	Carga máxima [kN]	Resistencia a la compresión [Kg/cm ²]	Vacíos de aire en la briqueta [%]
Briqueta	Diametro [mm]	Altura [mm]							
IC33-4_1	101.6	101.6	1723.6	898.2	1725.8	2.083	37.24	45.93	4.4
IC33-4_4	102.1	101.6	1700.6	891.2	1703.5	2.094	36.80	45.39	3.9
PROMEDIO SUBGRUPO 1 grupo seco						2.088	37.02	45.66	4.13
PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA									
SM-IC33-4_2	100.6	101.6	1733.6	906.5	1735.8	2.090	30.86	38.06	4.0
SM-IC33-4_3	102.4	101.5	1704.2	891.2	1706.9	2.089	29.58	36.56	4.1
PROMEDIO SUBGRUPO 2 grupo húmedo						2.090	30.22	37.31	4.05
Indice de Resistencia Conservada Promedio [%]							82		

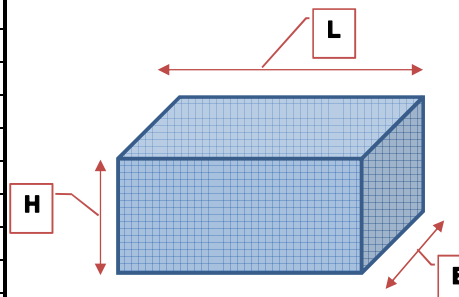
TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
ENSAYO DE AHUELLAMIENTO EMPLEANDO LA MAQUINA DE LA RUEDA CARGADA (INV E-779)		

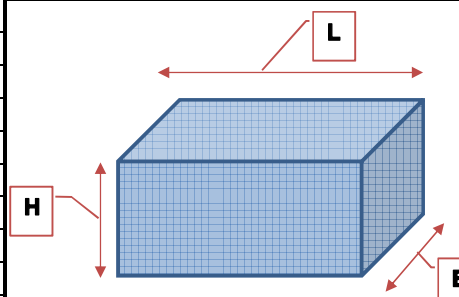
MEZCLA		MBRF+CH_23	Componentes	2% Agua		0% Cemento	
Briqueta		AH23-0		Dimensiones [mm]		Temperatura Ensayo [C°]	
Ciclos	Lectura [mm]	Ahuellamiento [mm]	Incremento [mm]	H	80.07	Inicial 17.5 Final 19.0	
				B	100.77		
				L	300.44		
0	16.01	0.00	0.00	Peso Briqueta [g]		4244	
100	16.19	0.18	0.18				
200	16.34	0.33	0.15				
300	16.46	0.45	0.12				
400	16.71	0.70	0.25				
500	16.90	0.89	0.19				
600	17.35	1.34	0.45				
700	17.95	1.94	0.60				
800	18.58	2.57	0.63				
900	18.80	2.79	0.22				
1000	19.16	3.15	0.36				
1100	19.62	3.61	0.46				

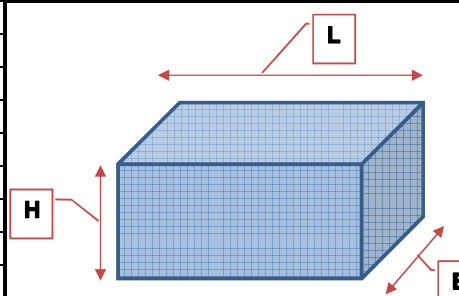
MEZCLA		MBRF+CH_23	Componentes	2% Agua		2% Cemento	
Briqueta			AH23-2	Dimensiones [mm]		Temperatura Ensayo [C°]	
Ciclos	Lectura [mm]	Ahuellamiento [mm]	Incremento [mm]	H	77.47	Inicial18.2	
				B	104.76		
				L	303.26	Final	18.6
0	16.20	0.00	0.00	Peso Briqueta [g]		4007	
100	16.23	0.03	0.03				
200	16.27	0.07	0.04				
300	16.33	0.13	0.06				
400	16.40	0.20	0.07				
500	16.45	0.25	0.05				
600	16.51	0.31	0.06				
700	16.56	0.36	0.05				
800	16.62	0.42	0.06				
900	16.68	0.48	0.06				
1000	16.74	0.54	0.06				
1100	16.80	0.60	0.06				

MEZCLA		MBRF+CH_33	Componentes	2% Agua	4% Cemento			
Briqueta		AH23-4		Dimensiones [mm]		Temperatura Ensayo [C°]		
Ciclos	Lectura [mm]	Ahuellamiento [mm]	Incremento [mm]	H	81.39	Inicial	18.5	
0	15.94	0.00	0.00	B	105.29	Final	19.1	
100	15.95	0.01	0.01	L	306.42	<div></div>		
200	15.95	0.01	0.00	Peso Briqueta [g]				4294
300	15.96	0.02	0.01					
400	15.96	0.02	0.00					
500	15.97	0.03	0.01					
600	15.98	0.04	0.01					
700	15.99	0.05	0.01					
800	16.00	0.06	0.01					
900	16.01	0.07	0.01					
1000	16.02	0.08	0.01					
1100	16.08	0.14	0.06					

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS		 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
ENSAYO DE AHUELLAMIENTO EMPLEANDO LA MAQUINA DE LA RUEDA CARGADA (INV E-779)		

MEZCLA		MBRF+CH_33	Componentes	3% Agua		0% Cemento	
Briqueta			AH33-0	Dimensiones [mm]		Temperatura Ensayo [C°]	
Ciclos	Lectura [mm]	Ahuellamiento [mm]	Incremento [mm]	H	79.96	Inicial16.3	
				B	100.26		
				L	305.22	Final	17.1
0	16.61	0.00	0.00	Peso Briqueta [g]		4327	
100	17.28	0.67	0.67				
200	17.31	0.70	0.03				
300	17.32	0.71	0.01				
400	17.35	0.74	0.03				
500	17.37	0.76	0.02				
600	17.45	0.84	0.08				
700	17.54	0.93	0.09				
800	17.70	1.09	0.16				
900	17.99	1.38	0.29				
1000	18.17	1.56	0.18				
1100	18.24	1.63	0.07				

MEZCLA		MBRF+CH_33	Componentes	3% Agua		2% Cemento	
Briqueta			AH33-2	Dimensiones [mm]		Temperatura Ensayo [C°]	
Ciclos	Lectura [mm]	Ahuellamiento [mm]	Incremento [mm]	H	77.45	Inicial18.6	
				B	100.52		
				L	302.65	Final19.0	
0	16.25	0.00	0.00	Peso Briqueta [g]		4274	
100	16.27	0.02	0.02				
200	16.31	0.06	0.04				
300	16.36	0.11	0.05				
400	16.48	0.23	0.12				
500	16.51	0.26	0.03				
600	16.54	0.29	0.03				
700	16.55	0.30	0.01				
800	16.57	0.32	0.02				
900	16.73	0.48	0.16				
1000	16.77	0.52	0.04				
1100	16.81	0.56	0.04				

MEZCLA		MBRF+CH_33	Componentes	3% Agua	4% Cemento		
Briqueta			AH33-4	Dimensiones [mm]		Temperatura Ensayo [C°]	
Ciclos	Lectura [mm]	Ahuellamiento [mm]	Incremento [mm]	H	74.95	Inicial	18.7
				B	100.38	Final	19.0
0	15.87	0.00	0.00	L	303.21		
100	15.88	0.01	0.01	Peso Briqueta [g]		4322	
200	15.89	0.02	0.01				
300	15.91	0.04	0.02				
400	15.96	0.09	0.05				
500	15.99	0.12	0.03				
600	16.03	0.16	0.04				
700	16.05	0.18	0.02				
800	16.07	0.20	0.02				
900	16.09	0.22	0.02				
1000	16.11	0.24	0.02				
1100	16.12	0.25	0.01				

	UNIVERSIDAD DE LOS ANDES DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL	CÓDIGO: NTC-309 FECHA: 04-Feb-2010 VERSIÓN: 0
	INFORME DE RESULTADOS - MODULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS INV E 754-7	Página 1 de 2

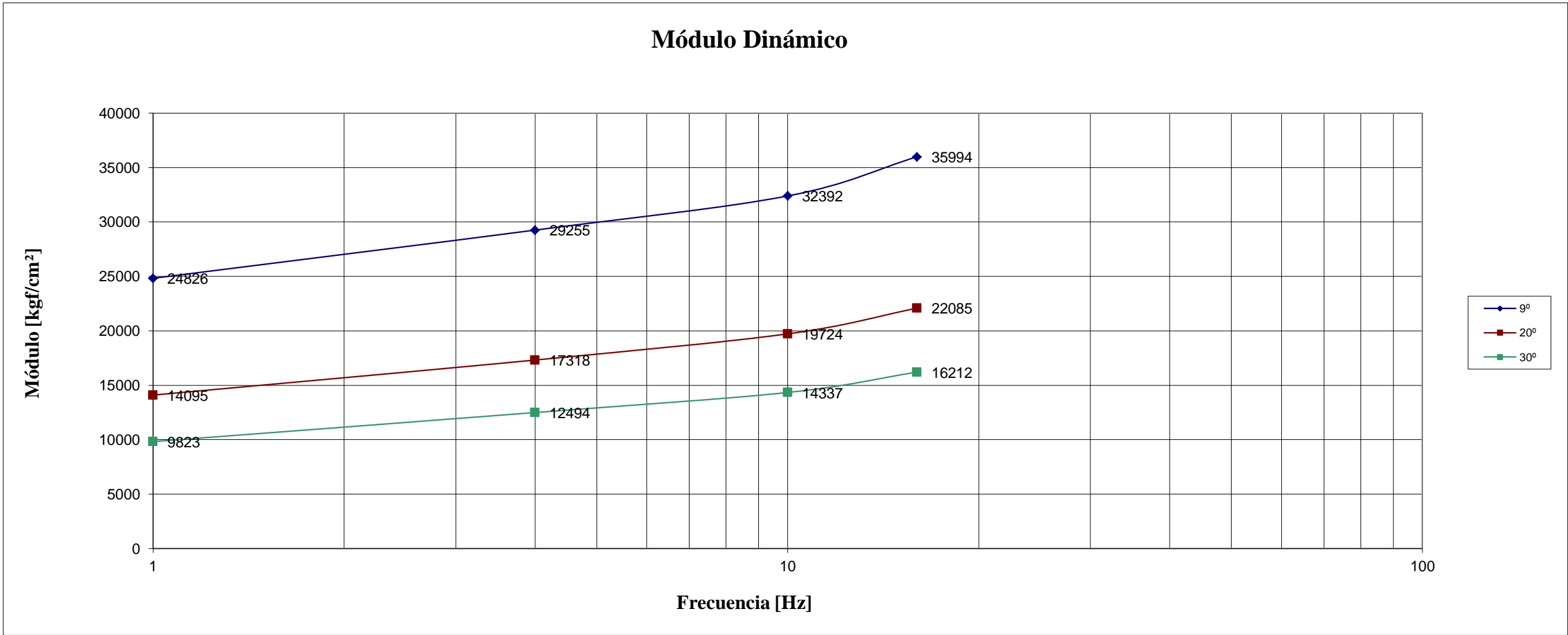
ORDEN DE TRABAJO 004-E-14 INFORME N° 004-001	Consecutivo Interno : 5196
	Muestra o Referencia: 0% cemento
	Fecha de Ensayo : 2014-01-29
	Fecha de Recepción : 2013-11-21

Diámetro Promedio : 10.3 cm	Area Promedio: 82.73 cm²
Altura Promedio: 20.16 cm	

Temperatura de Ensayo [°C]	Frecuencia [Hz]	Amplitudes de Carga Promedio [kgf]	Deformación Unitaria Promedio [mm/mm]	Modulo Dinámico Promedio [kgf/cm²]
9.1	1	179	0.000087	24826
	4	178	0.000074	29255
	10	179	0.000067	32392
	16	177	0.000059	35994
20.1	1	178	0.000153	14095
	4	178	0.000124	17318
	10	179	0.000110	19724
	16	177	0.000097	22085
30.1	1	178	0.000219	9823
	4	178	0.000172	12494
	10	179	0.000151	14337
	16	178	0.000133	16212

CLIENTE: CAROL ANDREA MURILLO FEO	DIRECCION: UNIVERSIDAD NACIONAL BOGOTÁ
EL PRESENTE ENSAYO NO PODRA REPRODUCIRSE NI PARCIAL NI TOTALMENTE SIN LA APROBACION POR PARTE DEL DIRECTOR DEL LABORATORIO LOS RESULTADOS DE ESTE ENSAYO SOLO SON APLICABLES A LAS MUESTRAS ENSAYADAS.	

<div>ORDEN DE TRABAJO</div> <div>004-E-14</div> <div>INFORME N°</div> <div>004-001</div>	Consecutivo Interno : _____ 5196 _____
	Muestra o Referencia: _____ 0% cemento _____
	Fecha de Ensayo : _____ 2014-01-29 _____
	Fecha de Recepción : _____ 2013-11-21 _____



OBSERVACIONES GENERALES:


Probeta suministra por el cliente , fecha de compactación 2013-11-17

Las temperaturas del ensayo ,fueron suministradas por el cliente.

Alejandro Peña León

Profesional Analista de Calidad

FIN DEL INFORME

	UNIVERSIDAD DE LOS ANDES DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL	CÓDIGO: NTC-309 FECHA: 04-Feb-2010 VERSIÓN: 0
	INFORME DE RESULTADOS - MODULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS INV E 754-7	

<div>ORDEN DE TRABAJO</div> <div>004-E-14</div> <div>INFORME N°</div> <div>004-002</div>	Consecutivo Interno : <u>5197</u>
	Muestra o Referencia: <u>1% de cemento</u>
	Fecha de Ensayo : <u>2014-01-29</u>
	Fecha de Recepción : <u>2013-11-21</u>

Diámetro Promedio : <u>10.1</u> cm Altura Promedio: <u>21.37</u> cm	Area Promedio: <u>80.86</u> cm ²
--	---

Temperatura de Ensayo [°C]	Frecuencia [Hz]	Amplitudes de Carga Promedio [kgf]	Deformación Unitaria Promedio [mm/mm]	Modulo Dinámico Promedio [kgf/cm ²]
9.1	1	179	0.000101	21789
	4	178	0.000089	24736
	10	180	0.000085	26188
	16	179	0.000081	27355
20	1	179	0.000131	16859
	4	178	0.000112	19637
	10	178	0.000104	21203
	16	178	0.000097	22776
30.1	1	178	0.000169	13014
	4	178	0.000142	15468
	10	179	0.000129	17194
	16	179	0.000120	18385

CLIENTE: <u>CAROL ANDREA MURILLO FEO</u>	DIRECCION: <u>UNIVERSIDAD NACIONAL BOGOTÁ</u>
EL PRESENTE ENSAYO NO PODRA REPRODUCIRSE NI PARCIAL NI TOTALMENTE SIN LA APROBACION POR PARTE DEL DIRECTOR DEL LABORATORIO LOS RESULTADOS DE ESTE ENSAYO SOLO SON APLICABLES A LAS MUESTRAS ENSAYADAS.	



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL

INFORME DE RESULTADOS - MODULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
INV E 754-7

CÓDIGO: NTC-309

FECHA: 04-Feb-2010

VERSIÓN: 0

Página 2 de 2

**ORDEN DE TRABAJO
004-E-14
INFORME N°
004-002**

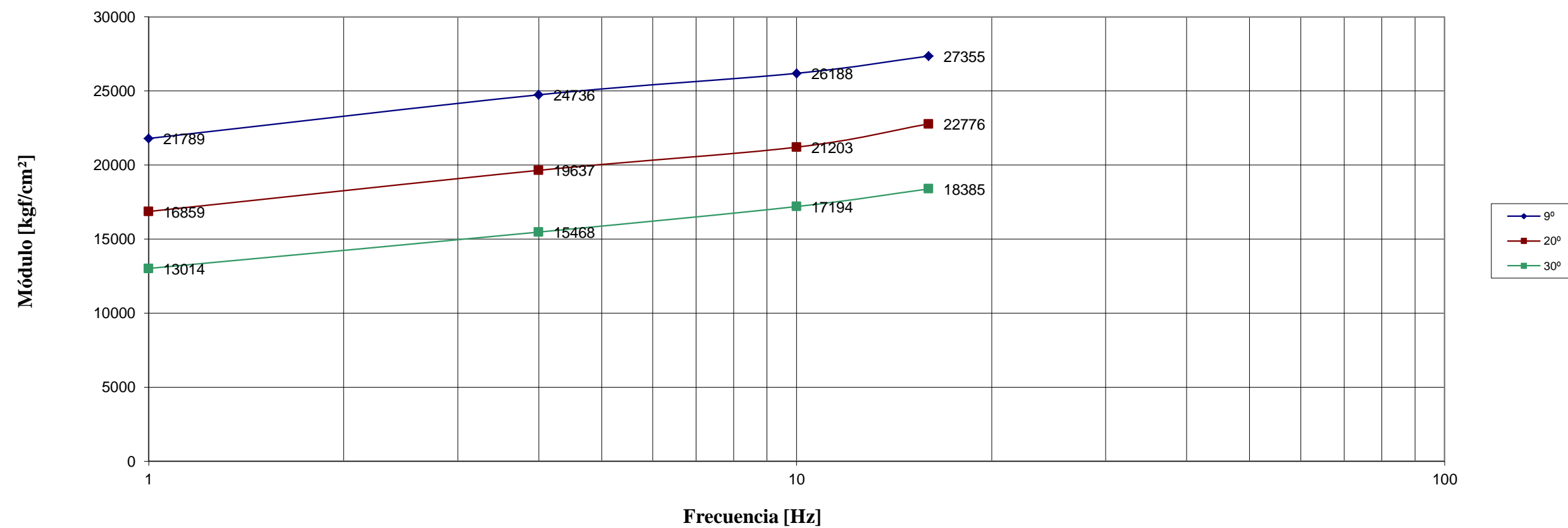
Consecutivo Interno : 5197

Muestra o Referencia: 1% de cemento

Fecha de Ensayo : 2014-01-29

Fecha de Recepción : 2013-11-21

Módulo Dinámico



OBSERVACIONES GENERALES:

Probeta suministra por el cliente , fecha de compactación 2013-11-12

Las temperaturas del ensayo fueron suministradas por el cliente.

Alejandro Peña León

Profesional Analista de Calidad

FIN DEL INFORME

	UNIVERSIDAD DE LOS ANDES DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL	CÓDIGO: NTC-309 FECHA: 04-Feb-2010 VERSIÓN: 0 Página 1 de 2
	INFORME DE RESULTADOS - MODULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS INV E 754-7	

ORDEN DE TRABAJO 004-E-14 INFORME N° 004-003	Consecutivo Interno : <u>5195</u>
	Muestra o Referencia: <u>2% de cemento</u>
	Fecha de Ensayo : <u>2014-01-29</u>
	Fecha de Recepción : <u>2013-11-21</u>

Diámetro Promedio : <u>10.1</u> cm Altura Promedio: <u>20.57</u> cm	Area Promedio: <u>80.60</u> cm ²
--	--

Temperatura de Ensayo [°C]	Frecuencia [Hz]	Amplitudes de Carga Promedio [kgf]	Deformación Unitaria Promedio [mm/mm]	Modulo Dinámico Promedio [kgf/cm ²]
9.1	1	179	0.000073	30454
	4	179	0.000063	34965
	10	179	0.000059	37776
	16	179	0.000053	41550
20.1	1	178	0.000110	20167
	4	178	0.000093	23737
	10	179	0.000084	26381
	16	179	0.000079	28280
30.1	1	178	0.000140	15704
	4	179	0.000118	18860
	10	179	0.000107	20832
	16	179	0.000091	24348

CLIENTE: <u>CAROL ANDREA MURILLO FEO</u>	DIRECCION: <u>UNIVERSIDAD NACIONAL BOGOTÁ</u>
EL PRESENTE ENSAYO NO PODRA REPRODUCIRSE NI PARCIAL NI TOTALMENTE SIN LA APROBACION POR PARTE DEL DIRECTOR DEL LABORATORIO LOS RESULTADOS DE ESTE ENSAYO SOLO SON APLICABLES A LAS MUESTRAS ENSAYADAS.	



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL

INFORME DE RESULTADOS - MODULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
INV E 754-7

CÓDIGO: NTC-309

FECHA: 04-Feb-2010

VERSIÓN: 0

Página 2 de 2

**ORDEN DE TRABAJO
004-E-14
INFORME N°
004-003**

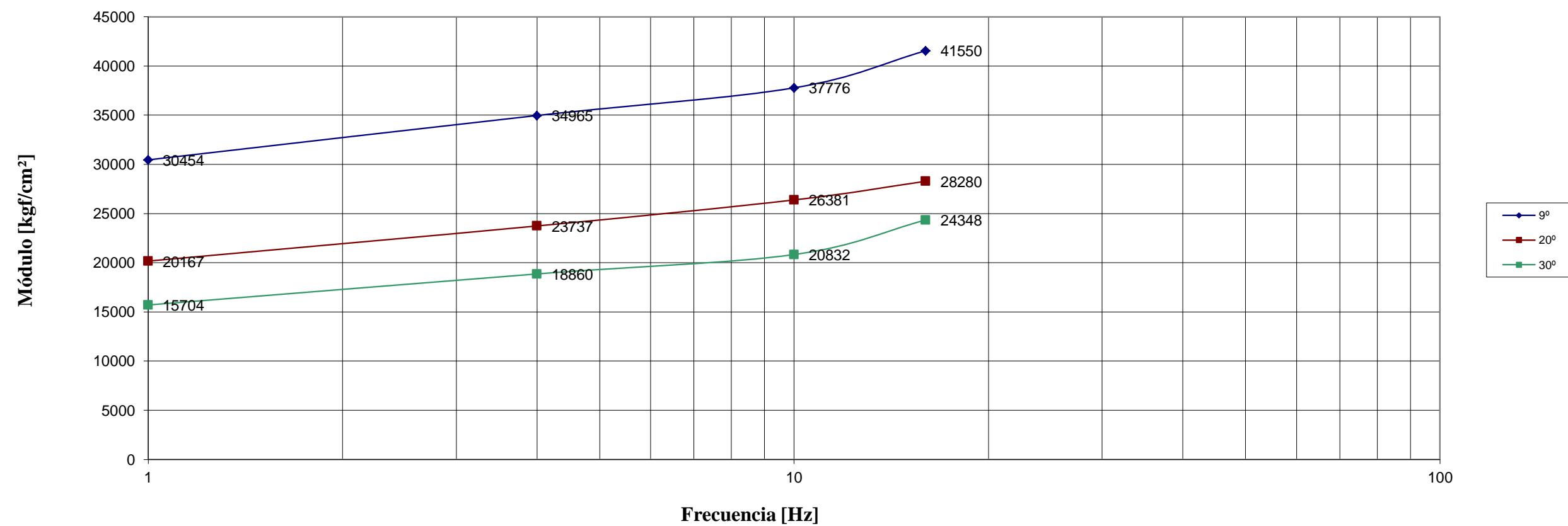
Consecutivo Interno : 5195

Muestra o Referencia: 2% de cemento

Fecha de Ensayo : 2014-01-29

Fecha de Recepción : 2013-11-21

Módulo Dinámico



OBSERVACIONES GENERALES:


Probeta suministrada por el cliente, fecha de compactación 2013-11-13

Las temperaturas del ensayo fueron suministradas por el cliente.

Alejandro Peña León

Profesional Analista de Calidad

FIN DEL INFORME

	UNIVERSIDAD DE LOS ANDES DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL	CÓDIGO: NTC-309 FECHA: 04-Feb-2010 VERSIÓN: 0
	INFORME DE RESULTADOS - MODULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS INV E 754-7	

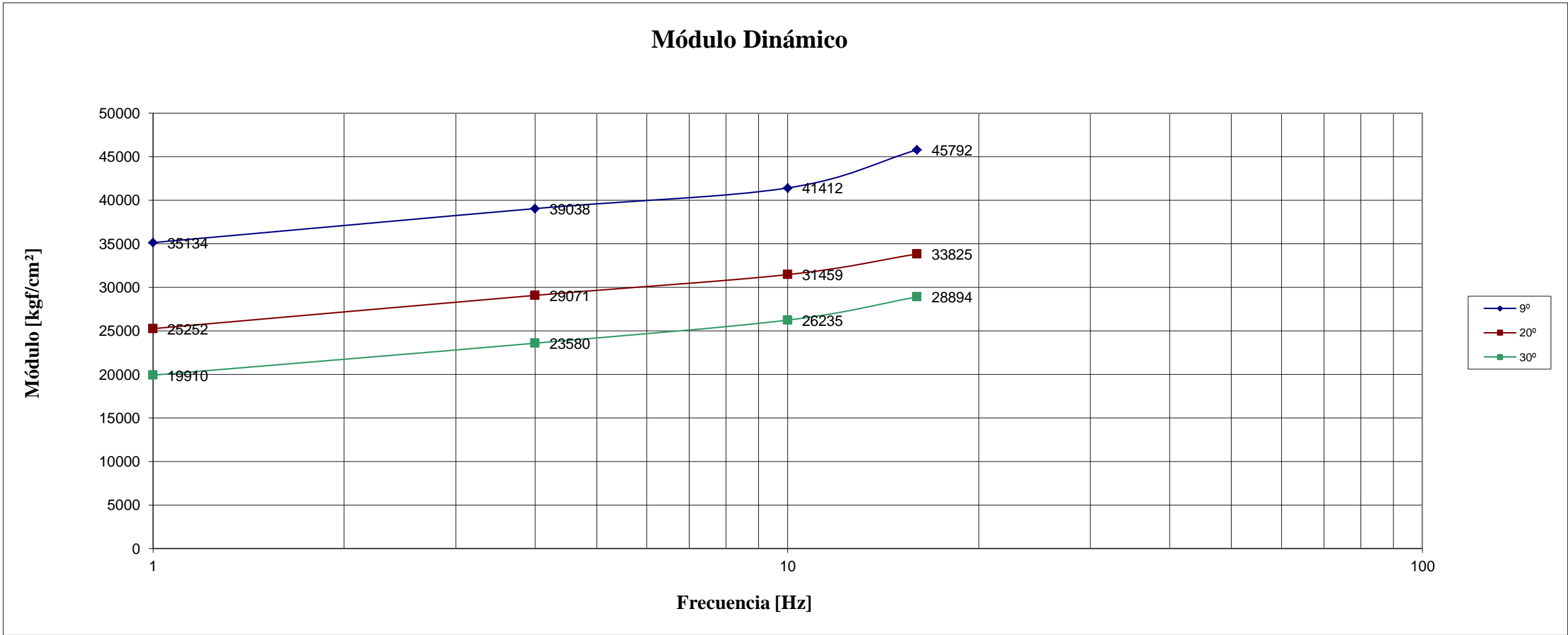
<div>ORDEN DE TRABAJO</div> <div>004-E-14</div> <div>INFORME N°</div> <div>004-004</div>	Consecutivo Interno : <u>5198</u>
	Muestra o Referencia: <u>3% de cemento</u>
	Fecha de Ensayo : <u>2014-01-29</u>
	Fecha de Recepción : <u>2013-11-21</u>

Diámetro Promedio : <u>10.1</u> cm Altura Promedio: <u>21.20</u> cm	Area Promedio: <u>80.81</u> cm ²
--	---

Temperatura de Ensayo [°C]	Frecuencia [Hz]	Amplitudes de Carga Promedio [kgf]	Deformación Unitaria Promedio [mm/mm]	Modulo Dinámico Promedio [kgf/cm ²]
9.1	1	179	0.000063	35134
	4	179	0.000057	39038
	10	180	0.000054	41412
	16	179	0.000048	45792
20.1	1	178	0.000087	25252
	4	178	0.000076	29071
	10	179	0.000070	31459
	16	177	0.000065	33825
30.1	1	178	0.000111	19910
	4	179	0.000094	23580
	10	179	0.000084	26235
	16	179	0.000077	28894

CLIENTE: <u>CAROL ANDREA MURILLO FEO</u>	DIRECCION: <u>UNIVERSIDAD NACIONAL BOGOTÁ</u>
EL PRESENTE ENSAYO NO PODRA REPRODUCIRSE NI PARCIAL NI TOTALMENTE SIN LA APROBACION POR PARTE DEL DIRECTOR DEL LABORATORIO LOS RESULTADOS DE ESTE ENSAYO SOLO SON APLICABLES A LAS MUESTRAS ENSAYADAS.	

<div>ORDEN DE TRABAJO</div> <div>004-E-14</div> <div>INFORME N°</div> <div>004-004</div>	Consecutivo Interno : _____ 5198
	Muestra o Referencia: _____ 3% de cemento
	Fecha de Ensayo : _____ 2014-01-29
	Fecha de Recepción : _____ 2013-11-21




OBSERVACIONES GENERALES:

Probeta suministra por el cliente , fecha de compactación 2013-11-20

Las temperaturas del ensayo fueron suministradas por el cliente.

Alejandro Peña León

Profesional Analista de Calidad

	UNIVERSIDAD DE LOS ANDES DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL	CÓDIGO: NTC-309 FECHA: 04-Feb-2010 VERSIÓN: 0 Página 1 de 2
	INFORME DE RESULTADOS - MODULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS INV E 754-7	

ORDEN DE TRABAJO 004-E-14 INFORME N° 004-005	Consecutivo Interno : <u>5199</u>
	Muestra o Referencia: <u>4% de cemento</u>
	Fecha de Ensayo : <u>2014-01-29</u>
	Fecha de Recepción : <u>2013-11-21</u>

Diámetro Promedio : <u>10.2</u> cm Altura Promedio: <u>20.67</u> cm	Area Promedio: <u>80.91</u> cm ²
--	--

Temperatura de Ensayo [°C]	Frecuencia [Hz]	Amplitudes de Carga Promedio [kgf]	Deformación Unitaria Promedio [mm/mm]	Modulo Dinámico Promedio [kgf/cm ²]
9.1	1	179	0.000066	33345
	4	179	0.000059	37623
	10	180	0.000055	40492
	16	179	0.000053	41688
20.1	1	178	0.000092	23962
	4	178	0.000079	27812
	10	180	0.000073	30298
	16	178	0.000068	32258
30.1	1	178	0.000111	19795
	4	178	0.000094	23322
	10	179	0.000086	25719
	16	178	0.000078	28262

CLIENTE: <u>CAROL ANDREA MURILLO FEO</u>	DIRECCION: <u>UNIVERSIDAD NACIONAL BOGOTÁ</u>
EL PRESENTE ENSAYO NO PODRA REPRODUCIRSE NI PARCIAL NI TOTALMENTE SIN LA APROBACION POR PARTE DEL DIRECTOR DEL LABORATORIO LOS RESULTADOS DE ESTE ENSAYO SOLO SON APLICABLES A LAS MUESTRAS ENSAYADAS.	



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL

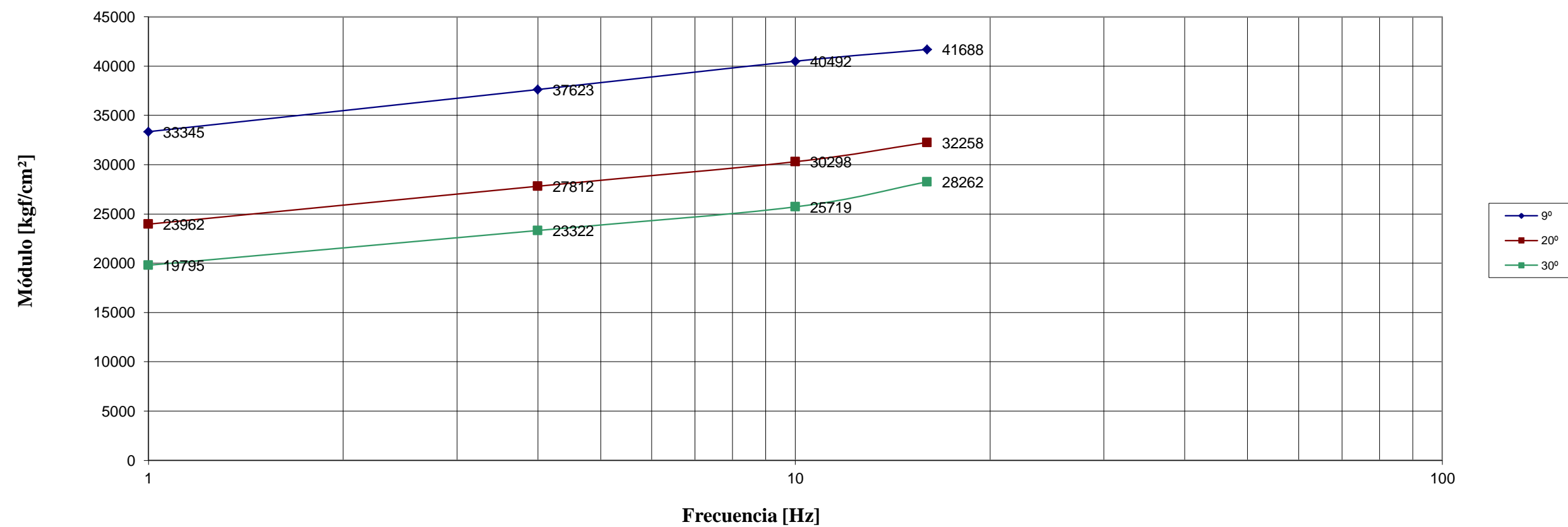
INFORME DE RESULTADOS - MODULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
INV E 754-7

CÓDIGO: NTC-309
FECHA: 04-Feb-2010
VERSIÓN: 0
Página 2 de 2

**ORDEN DE TRABAJO
004-E-14
INFORME N°
004-005**

Consecutivo Interno : 5199
Muestra o Referencia: 4% de cemento
Fecha de Ensayo : 2014-01-29
Fecha de Recepción : 2013-11-21

Módulo Dinámico



OBSERVACIONES GENERALES:

Probeta suministrada por el cliente , fecha de compactación 2013-11-16

Las temperaturas del ensayo fueron suministradas por el cliente.

Alejandro Peña León
Profesional Analista de Calidad

FIN DEL INFORME

E. Anexo: Registro fotográfico de la campaña experimental

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS**



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE MATERIAL FRESADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO (INV E-213)



TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

CONTENIDO DE HUMEDAD DEL RAP (INV E-122)



TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

ÍNDICE DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO (INV E-230)



TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS**



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS EN LOS AGREGADOS (INV E-227)



*Ensayo realizado en los Laboratorios de Suelos y Pavimentos del IEI - Universidad Nacional de Colombia

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS**



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

PESO UNITARIO DE LOS AGREGADOS (INV E-217)



*Ensayo realizado en los Laboratorios de Suelos y Pavimentos del IEI - Universidad Nacional de Colombia

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

PESO ESPECÍFICO DE LOS AGREGADOS (INV E-222/223)



TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS**



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

CONTENIDO DE ASFALTO – EXTRACCIÓN (INV E-732)



*Ensayo realizado en los Laboratorios de Suelos y Pavimentos del IEI - Universidad Nacional de Colombia

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS**



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

RECUPERACIÓN DEL ASFALTO DE UNA SOLUCIÓN UTILIZANDO EL ROTAVAPOR (INV E-759)



*Ensayo realizado en los Laboratorios de Suelos y Pavimentos del IEl - Universidad Nacional de Colombia

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS**



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO (INV E-711)



*Ensayo realizado en los Laboratorios de Suelos y Pavimentos del IEI - Universidad Nacional de Colombia

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS**



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE MATERIALES BITUMINOSOS (APARATO DE ANILLO Y BOLA) INV E-712



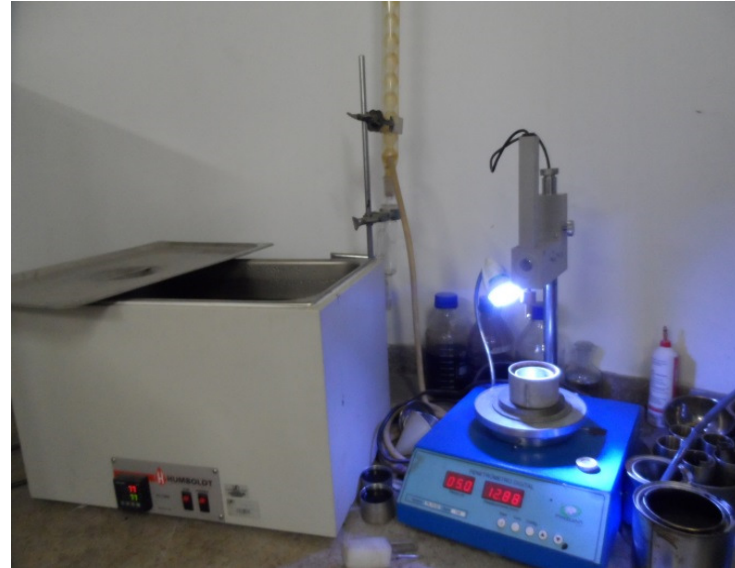
*Ensayo realizado en los Laboratorios de Suelos y Pavimentos del IEI - Universidad Nacional de Colombia

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS**



PENETRACIÓN DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS INV E-706



*Ensayo realizado en los Laboratorios de Suelos y Pavimentos del IEl - Universidad Nacional de Colombia

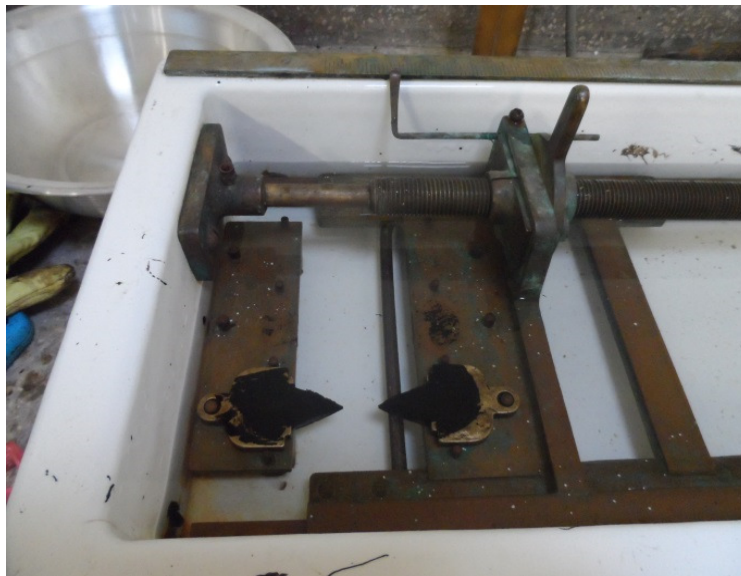
TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS**



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

DUCTILIDAD DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS ASTM D-113 INV E-702



TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS**



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

VISCOSIDAD BROOKFIELD INV E-709



*Ensayo realizado en los Laboratorios de Suelos y Pavimentos del IEI - Universidad Nacional de Colombia

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS



ENSAYO MARSHALL (ESTABILIDAD Y FLUJO) (INV E-748)



*Ensayo realizado en los Laboratorios de la Planta de Asfalto de Concescol

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS**



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA (INV E-725)



*Ensayo realizado en los Laboratorios de la Planta de Asfalto de Concescol

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS**



ENSAYO DE INMERSIÓN-COMPRESIÓN (INV E-738)



*Ensayo realizado en los Laboratorios de la Planta de Asfalto de Concescol

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

ENSAYO DE AHUELLAMIENTO (INV E-779)



TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA - MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTECNIA

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO
PAVIMENTO RECICLADO, LIGANTES HIDRÁULICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS**



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO (INV E-754)



*Ensayo realizado en los Laboratorios de Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes